

CLIMATE CHANGE

51/2025

Teilbericht

Ansätze zur Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren

Vergleichende Analyse

von:

Niklas Domke

Humboldt-Universität zu Berlin

Hans Joosten

DUENE e.V., Partner im Greifswald Moor Centrum, Greifswald

Harald Grethe

Humboldt-Universität zu Berlin

Georg Lukas

Humboldt-Universität zu Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 51/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3723 NK 101 0
FB001774

Teilbericht

Ansätze zur Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren

Vergleichende Analyse

von

Niklas Domke
Humboldt-Universität zu Berlin

Hans Joosten
DUENE e.V., Partner im Greifswald Moor Centrum,
Greifswald

Harald Grethe
Humboldt-Universität zu Berlin

Georg Lukas
Humboldt-Universität zu Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet : www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Humboldt-Innovation GmbH
Ziegelstraße 30
10117 Berlin

Abschlussdatum:

Juli 2025

Redaktion:

Fachgebiet V 2.6 – Klimaschutzprojekte – Nationale Zustimmungsstelle UNFCCC
Dr. Friederike Erleben
Samuel Pearson

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8080>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Ansätze zur Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren

Die großflächige Entwässerung von Mooren führt zum Abbau des über Jahrtausende abgelagerten Torfes und macht sie von einer Netto-Treibhausgas-Senke zu einer -Quelle, die heute etwa 7 % der gesamten deutschen Treibhausgas-(THG)-Emissionen entspricht. Eine möglichst exakte und flächendeckende Abschätzung ihrer gegenwärtigen THG-Emissionen ermöglicht die Entwicklung standortangepasster Klimaschutzmaßnahmen und dient als Fortschrittsnachweis hinsichtlich der Erreichung nationaler und privater Klimaziele. In dieser Studie werden drei THG-Erfassungsansätze vorgestellt und miteinander verglichen:

1. Die nationale THG-Berichterstattung gemäß der UN Klimarahmenkonvention,
2. die THG-Berichterstattung einzelner Unternehmen und Institutionen unter Verwendung der Standards des „Greenhouse Gas Protocol“
3. und verschiedene Standards für Moorklimaschutzprojekte.

Besonders betrachtet wird das methodische Vorgehen bei der Erfassung von THG-Emissionen. Unterschiede ergeben sich aus den jeweiligen Zielsetzungen und dem dadurch voneinander abweichenden räumlichen und temporalen Bezug. Es unterscheiden sich sowohl die zugrundeliegenden Moorbodendefinitionen als auch die berücksichtigten Standortparameter und Landnutzungsinformationen sowie die darauf aufbauende Abschätzung von THG-Emissionen. Eine Übertragung der Ergebnisse eines Ansatzes auf einen anderen ist daher nicht möglich. Einzelne methodische Elemente können jedoch zur Erhöhung der Genauigkeit eines anderen Ansatzes herangezogen werden. Dieser Forschungsbericht ermöglicht es politischen Entscheidungsträger*innen und der Fachöffentlichkeit, die verschiedenen THG-Erfassungsansätze hinsichtlich ihrer Qualität und Aussagekraft kritisch einzuordnen und voneinander abzugrenzen.

Abstract: Approaches for the accounting of greenhouse gas emissions from peatlands

The large-scale drainage of peatlands leads to the decomposition of peat accumulated over thousands of years and transforms them from a net greenhouse gas (GHG) sink into a source that currently accounts for about 7% of total German GHG emissions. Estimating its current GHG emissions as accurately and comprehensively as possible enables the development of site-adapted climate protection measures and serves as proof of progress towards achieving national and private climate targets. This study presents and compares three GHG accounting approaches:

1. The national GHG reporting under the UN Climate Convention,
2. the reporting of individual companies and institutions using the Greenhouse Gas Protocol
3. and multiple standards for peatland protection projects.

The methodological approaches for the accounting of GHG emissions are analysed in particular. Differences arise from the respective objectives and the resulting differences in the spatial and temporal reference of the approaches. As a result of the methodological differences in the definition of peatland soils, the consideration and recording of activity data as well as the estimation of GHG emissions none of the approaches can be transferred to other approaches without adjustments. However, certain methodological elements of one approach can increase the accuracy of another approach. This research report enables political decision-makers and the specialist public to critically categorise and differentiate between the various GHG accounting approaches in terms of their quality and informative value.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	10
Summary.....	16
1 Einleitung.....	21
2 Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren.....	24
2.1 Abgrenzung von Moorböden.....	25
2.2 Einfluss von Standorteigenschaften und Landnutzung auf Prozesse der Emission und - Einbindung von Treibhausgasen.....	27
2.2.1 Ablaufende Prozesse.....	27
2.2.2 Aktivitätsdaten – Standorteigenschaften und Landnutzung.....	28
2.2.3 Erfassung von Aktivitätsdaten.....	32
2.3 Abschätzung von Treibhausgasemissionen.....	36
2.3.1 Bildung von Emissionsklassen und Emissionsfaktoren.....	36
2.3.2 Die Tier Ansätze zur Darstellung der methodischen Genauigkeit.....	37
2.4 Zwischenfazit.....	38
3 Vergleichende Analyse von Ansätzen zur Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren .	40
3.1 Anwendungsbereich.....	40
3.1.1 Zweck und Zielgruppe.....	40
3.1.2 Temporaler Bezug.....	42
3.1.3 Geographischer Bezug.....	44
3.1.4 Berücksichtigte Moorböden.....	46
3.2 Methoden.....	48
3.2.1 Methodische Grundsätze.....	48
3.2.2 Räumliche Auflösung.....	49
3.2.3 Erfassung von Aktivitätsdaten.....	51
3.2.4 Abschätzung von Treibhausgasemissionen.....	54
3.3 Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit.....	58
3.4 Zwischenfazit.....	60
4 Vergleich der Ansätze anhand einer Projektfläche.....	62
4.1 Eigenschaften der Projektfläche.....	62
4.2 Abschätzung von Treibhausgasemissionen der Projektfläche.....	64

4.3	Rolle von Organisationsgrenzen in der unternehmerischen Treibhausgasberichterstattung.....	70
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	72
6	Quellenverzeichnis	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick: Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren	24
Abbildung 2:	Abhängigkeit der Netto-THG-Emissionen vom Grundwasserflurabstand	29
Abbildung 3:	Flächige Erfassung von Aktivitätsdaten	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick: Einfluss von Aktivitätsdaten auf die THG-Emissionen aus Mooren	32
Tabelle 2:	THG-Erfassungsansätze: Temporaler Bezug	42
Tabelle 3:	THG-Erfassungsansätze: Projektion und Monitoring von Szenarien in Moorklimaschutzprojektstandards.....	43
Tabelle 4:	THG-Erfassungsansätze: Geographischer Bezug	45
Tabelle 5:	THG-Erfassungsansätze: Berücksichtigte Moorböden	47
Tabelle 6:	THG-Erfassungsansätze: Räumliche Auflösung	50
Tabelle 7:	THG-Erfassungsansätze: Erfasste Aktivitätsdaten zur Abschätzung von THG-Emissionen	52
Tabelle 8:	THG-Erfassungsansätze: Erfassung von Aktivitätsdaten	54
Tabelle 9:	THG-Erfassungsansätze: Methodische Genauigkeit und berücksichtigte Treibhausgase	56
Tabelle 10:	Fiktive Beispielfläche: Vegetation und Landnutzung	63
Tabelle 11:	Fiktive Beispielfläche: Netto-CO ₂ -Emissionen	65
Tabelle 12:	Fiktive Beispielfläche: DOC Austräge.....	66
Tabelle 13:	Fiktive Beispielfläche: CH ₄ -Emissionen (Fläche)	67
Tabelle 14:	Fiktive Beispielfläche: CH ₄ -Emissionen (Graben)	68
Tabelle 15:	Fiktive Beispielfläche: N ₂ O-Emissionen	68
Tabelle 16:	Fiktive Beispielfläche: Gesamtemissionen	69
Tabelle 17:	Unternehmerische THG-Berichterstattung: Equity Share Ansatz und Ansatz der Finanziellen Kontrolle	70

Abkürzungsverzeichnis

C	Kohlenstoff
CH₄	Methan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CSR	Corporate Social Responsibility Directive (Richtlinie über die gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen)
EF	Emissionsfaktor
GESTs	Greenhouse Gas Emission Site Types (Treibhausgas-Emissions-Standorttypen)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
LULUCF-Sektor	Land Use, Land Use Change and Forestry (Landnutzungs, Landnutzungsänderungs und Forstwirtschafts) -Sektor
NDCs	Nationally Determined Contributions (Nationale Klimabeiträge)
N₂O	Lachgas
PCC	Peatland Carbon Code (Moorklimaschutzprojektstandard in Großbritannien)
RM	Statistisches Modell (Regressionsmodell)
SBTi	Science Based Targets initiative (Initiative für wissenschaftsbasierte Ziele)
THG	Treibhausgas
ÜvP	Übereinkommen von Paris
VCS	Verified Carbon Standard (Internationaler Klimaschutzprojektstandard)
WTD	Grundwasserflurabstand
WTD_e	Effektiver Grundwasserflurabstand

Zusammenfassung

Naturnahe Moore¹ tragen zum Erhalt von Biodiversität bei, haben einen positiven Einfluss auf die Regulierung des Landschaftswasserhaushaltes und fungieren durch Torfbildung als Kohlenstoffsenke (Joosten et al., 2012). Ihre großflächige Entwässerung führt zum Abbau des abgelagerten Torfes und macht sie zu einer Netto-Treibhausgas-(THG-)Quelle. 2022 waren Moore und Anmoore in Deutschland mit einer Fläche von 1,8 Mio. ha für die Emission von etwa 54 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxidäquivalenten (t CO₂eq) verantwortlich. Das entspricht 7% der gesamten deutschen THG-Emissionen (UBA, 2024a).

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels, dem in Reaktion darauf geschlossenen Übereinkommen von Paris (ÜvP) und den THG-Neutralitätszielen der EU bis 2050 und Deutschlands bis 2045 rückt die Reduktion der THG-Emissionen aus entwässerten Mooren in den Vordergrund des moorpolitischen Handelns (BMUV, 2022, 2023; European Parliament & European Council, 2023). Die Entwicklung und Finanzierung von standortangepassten Klimaschutzmaßnahmen erfordern eine möglichst exakte und **flächendeckende Abschätzung der THG-Emissionen**. Diese ist auch für die nationale und unternehmerische THG-Berichterstattung sowie für privatwirtschaftlich initiierte Moorklimaschutzprojekte entscheidend.

Die exakte Quantifizierung der THG-Emissionen aus Mooren stellt eine große Herausforderung dar, da jeder Standort ein eigenes THG-Emissionsverhalten aufweist, welches nur durch kontinuierliche und kleinräumige THG-Messungen präzise abgebildet werden kann. Eine direkte Messung ist mit hohen Kosten verbunden und kann nur mit wissenschaftlicher Begleitung durchgeführt werden. Zur Abschätzung der THG-Emissionen wurde daher eine Reihe alternativer Methoden entwickelt, mit denen die THG-Emissionen auf der Basis von Standort- und Landnutzungsinformationen (sogenannten Aktivitätsdaten) abgeschätzt werden können.

Im Rahmen dieses Forschungsberichtes wird zunächst der Einfluss von Standortfaktoren und Landnutzung auf die in Mooren ablaufenden Prozesse und die damit in Verbindung stehenden THG-Flüsse erläutert. Anschließend werden die Methoden verschiedener Moorklimaschutzprojektstandards sowie der nationalen und unternehmerischen THG-Berichterstattung hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert. Politische Entscheidungsträger*innen und die Fachöffentlichkeit können die THG-Erfassungsansätze auf dieser Grundlage kritisch bewerten und voneinander abgrenzen. Außerdem zeigt die Analyse Potenziale und Grenzen für die Verknüpfung unterschiedlicher Daten und Methoden auf.

Die Ermittlung der THG-Emissionen aus Mooren setzt eine **Abgrenzung dieser von anderen Gebieten** bzw. Bodentypen voraus. Das zentrale Charakteristikum von Moorböden ist das Vorhandensein einer Torfschicht an oder nah an der Oberfläche. Ein Bodensubstrat wird als Torf bezeichnet, wenn es sedimentär abgelagert ist und der Anteil organischer Substanz einen international nicht standardisierten Schwellenwert übersteigt. Eine weitere definierende Eigenschaft ist die Mächtigkeit der Torfschicht. Auch diesbezüglich gibt es international unterschiedliche Mindestanforderungen.

Die THG-Emissionen von Mooren werden von einer Vielzahl zeitgleich **ablaufender Prozesse** bestimmt. Einige führen zur Emission von THG in die Atmosphäre, andere zu deren Einbindung.

¹ In dieser Veröffentlichung werden die Begriffe Moor und Moorboden synonym für all jene Gebiete verwendet, die der in der deutschen THG-Berichterstattung verwendeten Definition kohlenstoffreicher Böden entsprechen. Eine Auseinandersetzung mit der Moordefinition erfolgt in Kapitel 2.1.

Das Auftreten und die Intensität der Prozesse hängt von der Ausprägung bestimmter **Standorteigenschaften und der Landnutzung** (=Aktivitätsdaten) ab.

Die An- bzw. Abwesenheit von **Wasser** hat den stärksten Einfluss auf die THG-Emissionen aus Mooren, da hierdurch die Sauerstoffverfügbarkeit im Boden beeinflusst wird (Evans et al., 2021; Wilson et al., 2016). Als Indikator für die Sauerstoffverfügbarkeit in einem Moorboden wird oftmals der Grundwasserflurabstand herangezogen. Dieser entspricht dem Abstand zwischen dem wassergesättigten Bereich des Bodens und der Bodenoberfläche (Flur). Während es unter oxidischen Bedingungen (Sauerstoff ist verfügbar) in erster Linie zur Emission von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Lachgas (N₂O) kommt (Evans et al., 2021; Leppelt et al., 2014), wird unter anoxischen Bedingungen (kein Sauerstoff verfügbar) auch Methan (CH₄) freigesetzt (Turetsky et al., 2014).

Die **Torfmächtigkeit** beeinflusst die THG-Emissionen, da sie in Kombination mit der Lagerungsdichte und dem Kohlenstoffgehalt die in Moorböden gespeicherte Kohlenstoffmenge bestimmt (Roßkopf et al., 2015). Im Fall von entwässerten Mooren kann über die Torfmächtigkeit die Restzeit bis zum vollständigen Abbau der organischen Substanz eines Moorkörpers (Torferschöpfungszeit) ermittelt werden.

Von den in Moorböden befindlichen Nährstoffen hat **Stickstoff** den größten Einfluss auf die THG-Emissionen. Es besteht ein positiver Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt und den N₂O- (Leppelt et al., 2014; Tiemeyer et al., 2016) sowie den CO₂-Emissionen (Nielsen et al., 2023; Tiemeyer et al., 2016).

Der **pH-Wert** des Bodens wird in der Literatur vor allem als wichtige Einflussgröße auf die N₂O-Emissionen benannt. Je niedriger der pH-Wert, desto höher die N₂O-Emissionen (Leppelt et al., 2014).

Die klimatischen Parameter **Niederschlag, Temperatur und Belichtungsintensität** beeinflussen das THG-Emissionsverhalten von Mooren ebenfalls. Niederschläge wirken sich auf den Grundwasserflurabstand und die Bodenfeuchte aus. Weist ein entwässerter Moorboden eine ausreichende Bodenfeuchte auf, so ist sowohl die Intensität der Kohlenstoffbindung durch Photosynthese als auch die Kohlenstoffmineralisation bei höheren Temperaturen bzw. einer stärkeren Belichtungsintensität deutlich stärker ausgeprägt.

Die **Vegetation** beeinflusst die THG-Flüsse in Mooren, da sie im Zuge der Photosynthese CO₂ bindet und bestimmte Pflanzen den CH₄-Abtransport begünstigen. Gleichzeitig beeinflusst die Vegetation die mikrobielle Aktivität im Boden, indem sie leicht abbaubare Biomasse bereitstellt und Wurzelexsudate ausscheidet.

Im Rahmen der **anthropogenen Nutzung** von Mooren zu land- und forstwirtschaftlichen Zwecken oder als Infrastruktur- bzw. Siedlungsfläche wird aktiv Einfluss auf die Standorteigenschaften eines Moores und damit auf die THG-Emissionen genommen.

Die flächendeckende Abschätzung der THG-Emissionen eines Gebietes erfordert **flächenhafte Informationen über die relevanten Aktivitätsdaten** (Standorteigenschaften und Landnutzung). Während bei kleineren Gebieten Daten vor Ort erhoben werden können, müssen überregionale Ansätze in der Regel auf bereits verfügbare Datensätze zurückgreifen. Im Rahmen von Vor-Ort-Untersuchungen können abiotische Standorteigenschaften wie der Grundwasserflurabstand oder der Nährstoffgehalt im Boden unmittelbar gemessen werden. Dies liefert allerdings lediglich punktuelle Informationen. Zur Übertragung in die Fläche muss ergänzend auf flächig erfassbare Parameter zurückgegriffen werden (Vegetation, Geländemodell). Sowohl die punktuelle als auch die flächige Ermittlung von Standortfaktoren basiert auf kostenintensiven Verfahren. Ihnen werden daher bestehende Datensätze

vorgezogen, sofern dies ohne Abstriche bei der gewünschten Genauigkeit möglich ist. Für überregionale Analysen liegen Daten zur Ausdehnung von Mooren, deren Mächtigkeit und Typ, sowie dem Biotop- und Landnutzungstyp auf nationaler Ebene vor. Aufgrund des zentralen Einflusses des Grundwasserflurabstandes auf die THG-Emissionen aus Mooren wurde für Deutschland ein Modell für dessen überregionale Abschätzung entwickelt (Bechtold et al., 2014).

Auf Grundlage der erhobenen Aktivitätsdaten können die **THG-Emissionen einer Moorfläche** abgeschätzt werden. Dies geschieht entweder durch die Einordnung von Teilflächen in Emissionsklassen oder durch das Einsetzen bestimmter Aktivitätsdaten in statistische oder prozessbasierte Modelle. Zur Ermittlung der durchschnittlichen THG-Emissionen einer Emissionsklasse wird auf THG-Messungen zurückgegriffen, die für eine Emissionsklasse repräsentativ sind. Das Ergebnis sind sogenannte Emissionsfaktoren. Emissionsfaktoren geben die in einem Jahr auf einem Hektar durchschnittlich anfallende Netto-Emissionsmenge eines jeden THG an. Diese müssen mit der Gesamtfläche einer Teilfläche multipliziert werden.

Die THG-Emissionen aus Mooren werden in verschiedenen Zusammenhängen und zu unterschiedlichen Zwecken erfasst. Grundsätzlich können drei Arten von THG-Erfassungsansätzen unterschieden werden.

1. Auf staatlicher Ebene werden die THG-Emissionen zur Anfertigung **nationaler THG-Inventarberichte** gemäß der Klimarahmenkonvention erfasst. Diese zielen auf die Dokumentation und Rechenschaftslegung von Fortschritten im Bereich nationaler THG-Emissionsminderungsziele gegenüber der internationalen Staatengemeinschaft ab. In dieser Studie werden sowohl die internationalen Richtlinien des IPCC (2006, 2014) als auch dessen Ausgestaltung in Deutschland analysiert (UBA, 2024a).
2. **Moorklimaschutzprojekte** sind auf die Reduktion von THG-Emissionen ausgerichtet. Die transparente Quantifizierung der erzielbaren Emissionsminderungen ist für derartige Projekte essentiell, da sie die Grundlage für die Einwerbung öffentlicher wie privater Gelder darstellt. Aus der Vielzahl von Standards für Moorklimaschutzprojekte werden die deutschen Regionalstandards „MoorFutures“², „Moorland“³ und „Moorbenefits 2.0“⁴, der in Großbritannien verbreitete „Peatland Carbon Code“ (PCC)⁵ und die Methodologie VM0036 des internationalen „Verified Carbon Standard“ (VCS)⁶ exemplarisch betrachtet, im Folgenden unter „Projektstandards“ zusammengefasst.
3. **Unternehmen** bilanzieren die durch sie verursachten THG-Emissionen unter anderem, um öffentlichkeitswirksam über Klimaschutzbemühungen berichten zu können und gesetzlichen Verpflichtungen nachzukommen. Das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)⁷ ist der am weitesten verbreitete, private, transnationale Standard für die THG-Berichterstattung von Unternehmen und zunehmend auch von öffentlichen Instanzen. Die THG-Emissionen aus Mooren können bereits heute unter dem GHG Protocol erfasst werden, wobei Unternehmen dazu kaum einen Anreiz haben. Eine detaillierte Richtlinie zur Erfassung der THG-Emissionen befindet sich in der Entwicklung (WRI & WBCSD, 2022a).

Aus den unterschiedlichen Zwecken der THG-Erfassungsansätze ergeben sich Unterschiede in der jeweils eingenommenen **zeitlichen Perspektive**. Sowohl die nationale als auch die unternehmerische THG-Berichterstattung nehmen eine vergangenheitsorientierte Perspektive

² <https://www.moorfutures.de/>

³ <https://www.moor-land.de/>

⁴ <https://www.hswt.de/forschung/projekt/1795-moorbenefits-2-0>

⁵ <https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/peatland-code-0>

⁶ <https://verra.org/methodologies/vm0036-methodology-for-rewetting-drained-temperate-peatlands-v1-0/>

⁷ <https://ghgprotocol.org/>

ein. Sie betrachten die bereits entstandenen THG-Emissionen und halten sie in regelmäßig veröffentlichten Berichten fest. Im Gegensatz dazu sind die Projektstandards zukunftsorientiert. Hier steht die Abschätzung der potentiellen THG-Emissionsminderung geplanter Projekte und der Abgleich mit der tatsächlich erzielten Minderung nach der Projektdurchführung im Zentrum.

Werden in der unternehmerischen und nationalen THG-Berichterstattung THG-Emissionsminderungen ermittelt, werden die Emissionen einer aktuellen Periode mit denen einer vergangenen Periode verglichen. Im Gegensatz dazu werden in Moorklimaschutzprojekten zwei zukunftsorientierte Szenarien zur Abschätzung von THG-Emissionsminderungen entwickelt. In einem Referenzszenario wird die Entwicklung der THG-Emissionen ohne die Durchführung von Moorklimaschutzmaßnahmen projiziert. In einem Projektszenario wird die Entwicklung der THG-Emissionen mit Maßnahmendurchführung projiziert. Die Quantifizierung der THG-Emissionsminderung erfolgt auf Grundlage des Vergleichs beider Szenarien.

Die THG-Erfassungsansätze sind in unterschiedlichen Regionen anwendbar. Sowohl die Standards der nationalen THG-Berichterstattung als auch das GHG Protocol haben ein globales **Anwendungsgebiet**. Im Gegensatz dazu haben die untersuchten Moorklimaschutzprojektstandards ein begrenztes Anwendungsgebiet. Dieses beschränkt sich entweder auf eine Klimazone, ein Land oder eine Region in einem Land.

Die **Größe einzelner Untersuchungsgebiete** unterscheidet sich ebenfalls. Während das nationale THG-Inventar die gesamte Moorfläche eines Landes erfasst, erfasst die unternehmerische THG-Berichterstattung nur die vom berichterstattenden Unternehmen direkt (Scope 1) und indirekt (Scope 2/3) kontrollierten Flächen. Moorklimaschutzprojekte betrachten jeweils ein Projektgebiet, welches 5 bis mehrere 1000 ha groß sein kann.

Wird mit zwei THG-Erfassungsansätzen dasselbe Gebiet untersucht, kann sich die berücksichtigte Fläche aufgrund unterschiedlicher **Moorbodendefinitionen** unterscheiden. Für die nationale THG-Berichterstattung hat das IPCC die Definition organischer Böden der FAO adaptiert (IPCC, 2006, Annex 3A.5). Neben dieser Definition darf auch auf nationale Moorbodendefinitionen zurückgegriffen werden. Im GHG Protocol wird die vom IPCC adaptierte Moorbodendefinition der FAO als maßgebende Moorbodendefinition benannt. Ob alternativ auch die Verwendung anderer Definitionen zulässig ist, bleibt offen.

Moorklimaschutzprojektstandards machen keine Vorgaben bezüglich des minimalen Anteils organischer Substanz, jedoch oft bezüglich der minimalen Torfmächtigkeit. Bei Moorklimaschutzprojekten hängt die Projektion potentieller THG-Emissionsminderungen längerfristig wesentlich von der noch im Boden befindlichen Kohlenstoffmenge ab. Die Anforderungen an die Erfassung der minimalen Torfmächtigkeit als Indikator der gespeicherten Kohlenstoffmenge sind daher höher als sie es bei der nationalen und unternehmerischen THG-Berichterstattung sind.

Auch die Anforderungen an die **Landnutzung vor einer Wiedervernässung** variieren zwischen den Ansätzen. Während beim GHG Protocol und bei der nationalen THG-Berichterstattung alle gemanagten Moore zu berücksichtigen sind, beziehen sich die Projektstandards auf spezifische Nutzungsformen oder schließen einzelne Formen aus.

Jeder THG-Erfassungsansatz verfügt über ein eigenes Regelwerk, in welchem die **methodischen Anforderungen** an die Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren festgehalten sind. Der Grad der Ausdifferenzierung der Anforderungen variiert in Abhängigkeit des Einsatzbereiches und Zweckes des jeweiligen Ansatzes.

Das GHG Protocol stellt einen sehr breit anwendbaren Standard für die unternehmerische THG-Berichterstattung dar. Die methodischen Vorgaben bezüglich der Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren sind daher verhältnismäßig allgemein formuliert.

Für die nationale THG-Berichterstattung sind die IPCC Richtlinien heranzuziehen. Das IPCC unterscheidet drei Grade der methodischen Genauigkeit (Tier Ansätze) (IPCC, 2006, Vol. 1, Kap. 1). Während es sich bei den Tier 1 und Tier 2 Ansätzen um statische Ansätze handelt, die auf der Einteilung von Mooren in Klassen mit einem festgelegten Emissionsfaktor beruhen (Emissionsklassen), handelt es sich bei Tier 3 Ansätzen um dynamische Modelle, die auch graduelle Veränderungen von Aktivitätsdaten abbilden können (IPCC, 2006, Vol. 4, Kap. 2).

Die Moorklimaschutzprojektstandards definieren die anzuwendende THG-Erfassungsmethode am genauesten. Dies gilt sowohl für die definierten Anforderungen an die überwiegend im Feld stattfindende Erhebung von Aktivitätsdaten als auch für die zu verwendenden Emissionsklassen bzw. statistischen Modelle.

Die Abschätzung der THG-Emissionen eines Moorstandortes basiert in allen untersuchten THG-Erfassungsansätzen auf **Aktivitätsdaten**. Sowohl in den Moorklimaschutzprojektstandards als auch in den Standards der nationalen THG-Berichterstattung ist definiert, welche Aktivitätsdaten wie zu erfassen sind. Lediglich das GHG Protocol lässt die zu berücksichtigenden Aktivitätsdaten und deren Erfassung offen.

Neben der **klimatischen Lage** berücksichtigen alle THG-Erfassungsansätze den **Grundwasserflurabstand** als Einflussgröße auf die THG-Emissionen. Der durchschnittliche Grundwasserflurabstand fließt zentimetergenau in die modellbasierte THG-Erfassung der Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC sowie die deutsche THG-Berichterstattung ein. Bei MoorFutures und VCS kann er zur Verifizierung identifizierter Vegetationstypen genutzt werden. Bei fehlender Vegetation dient er auch hier unmittelbar der Abschätzung der THG-Emissionen. Der Tier 1 Ansatz der nationalen THG-Berichterstattung unterscheidet lediglich zwischen flach und tief entwässerten Mooren.

Als weitere Parameter werden sowohl die **Landnutzung als auch die Vegetation** von allen Ansätzen berücksichtigt. In der THG-Berichterstattung sowie den Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC wird auf eine grobe Landnutzungskategorisierung zur Abschätzung der THG-Emissionen zurückgegriffen. Genauere Vegetationsunterschiede werden unter den Projektstandards MoorFutures, Moorland und VCS erfasst.

Bodenparameter wie der Nährstoffgehalt oder pH-Wert werden in den untersuchten Ansätzen nur in geringem Umfang zur Abschätzung von THG-Emissionen herangezogen. Über die Erfassung der Landnutzung bzw. Vegetation werden sie indirekt berücksichtigt.

Die **Abschätzung der THG-Emissionen** erfolgt in den untersuchten Ansätzen auf zwei Weisen. Der Tier 1 Minimalstandard der THG-Berichterstattung und die Projektstandards MoorFutures, Moorland, VCS und PCC (bei Hochmooren) unterteilen ein Untersuchungsgebiet auf Grundlage der erfassten Aktivitätsdaten in homogene Teilflächen. Jede Teilfläche wird einer Emissionsklasse mit vordefinierten Emissionsfaktoren zugeordnet. In der deutschen THG-Berichterstattung und bei den Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC (bei Niedermooren) wird die Emission einzelner Treibhausgase auf Grundlage von statistischen Modellen räumlich und zum Teil zeitlich explizit bestimmt.

In allen Ansätzen sind die Netto-CO₂-Emissionen und die CH₄-Emissionen der Fläche abzuschätzen. Die CH₄-Emissionen aus Gräben und die N₂O-Emissionen werden hingegen nur von einzelnen Moorklimaschutzprojektstandards berücksichtigt und von andern konservativ vernachlässigt. In der nationalen und unternehmerischen THG-Berichterstattung sind diese Emissionen ebenso wie die Auswaschung von Kohlenstoff (dissolved organic carbon, DOC) grundsätzlich mit zu berücksichtigen.

Die **methodischen Unterschiede** sowohl im Bereich der Definition von Moorböden, der Berücksichtigung von Aktivitätsdaten und deren Erfassung als auch in der darauf aufbauenden Abschätzung von THG-Emissionen **führen dazu, dass keiner der Ansätze ohne Anpassungen auf andere Ansätze übertragen werden kann.**

Die Vergleichbarkeit der THG-Erfassungsansätze wird des Weiteren dadurch erschwert, dass die nationale THG-Berichterstattung auf eine **möglichst realitätsnahe Abschätzung** der Netto-THG-Emissionen abzielt, wohingegen sowohl das GHG Protocol als auch die Moorklimaschutzprojektstandards dem Grundsatz der **Konservativität** folgen: Beim GHG Protocol sollen Emissionen tendenziell überschätzt und THG-Einbindungen unterschätzt werden. Bei Moorklimaschutzprojekten werden die Emissionsminderungen unterschätzt.

Zur **Veranschaulichung der Unterschiede** zwischen den THG-Erfassungsansätzen werden die THG-Emissionen einer beispielhaft ausgewählten, in sieben Teilflächen untergliederten Projektfläche abgeschätzt. Dies geschieht unter Verwendung der Methoden der Moorklimaschutzprojektstandards MoorFutures und PCC sowie des deutschen Ansatzes und des Minimalstandards (Tier 1) der nationalen THG-Berichterstattung. Die für die knapp 55 Hektar große Fläche geschätzten THG-Emissionen reichen von ca. 600 t CO₂eq pro Jahr bis hin zu 1.600 t CO₂eq pro Jahr. Der deutliche Unterschied resultiert insbesondere aus der stark voneinander abweichenden Einschätzung der CO₂-Emissionen.

Das einfache Rechenbeispiel veranschaulicht, dass die im Rahmen von Moorklimaschutzprojekten erzielten Klimaschutzerfolge nicht in der für das Projekt quantifizierten Höhe auf die nationalen Klimaziele angerechnet werden können. Dasselbe gilt auch für die auf Unternehmensebene erfassten THG-Emissionen und -Einbindungen.

Trotz der großen Unterschiede kann die **Übertragung einzelner methodischer Elemente** die Genauigkeit eines anderen Ansatzes erhöhen bzw. den Erfassungsaufwand reduzieren. Ein Potential besteht beispielsweise im Austausch erhobener Aktivitätsdaten. Außerdem könnte die Verwendung von in der nationalen THG-Berichterstattung genutzten statistischen Modellen die Genauigkeit primär vegetationsbasierter Methoden (z. B. GESTs bei MoorFutures) bei großen Grundwasserflurabständen und reduzierter Artenvielfalt verbessern. Eine erhöhte Vergleichbarkeit könnte durch die Harmonisierung der weltweit verwendeten Moorbodendefinition erzielt werden.

Auch wenn die Emissionsabschätzungen unterschiedlicher Erfassungsansätze derzeit noch stark voneinander abweichen können und mit Unsicherheiten behaftet sind, ist es **Konsens**, dass die THG-Emissionen aus entwässerten Mooren hoch sind und eine zügige Reduktion der Emissionen nur durch eine baldige Wiedervernässung erzielt werden kann. Ein zielgerichtetes Handeln aller beteiligten Akteure ist auf Grundlage der bestehenden Methoden möglich. Die Verfeinerung der THG-Erfassungsansätze sollte nicht auf Kosten der Wiedervernässungsbemühungen geschehen.

Summary

Natural peatlands contribute to the preservation of biodiversity, have a positive influence on the regulation of the landscape water balance and act as a carbon sink through peat formation (Joosten et al., 2012). Their large-scale drainage leads to the decomposition of the stored peat and makes them a net source of greenhouse gases (GHG). In 2022, peatlands and peaty soils in Germany were responsible for the emission of around 54 million tonnes of carbon dioxide equivalents (t CO₂eq) over an area of 1.8 million hectares. This corresponds to 7% of total German GHG emissions (UBA, 2024a).

Against the backdrop of advancing climate change, the Paris Agreement and the GHG neutrality targets of the EU by 2050 and Germany by 2045, the reduction of GHG emissions from drained peatlands is moving to the centre of peatland policy action (BMUV, 2022, 2023; European Parliament & European Council, 2023). The development and financing of site-adapted climate protection measures requires an **estimate of GHG emissions** that is as accurate and comprehensive as possible. This is also crucial for national and corporate GHG reporting as well as for privately initiated peatland protection projects.

The exact quantification of GHG emissions from peatlands is a major challenge, as each site has its own GHG emission behaviour, which can only be precisely depicted by continuous and small-scale GHG measurements. Direct measurement is associated with high costs and can only be carried out with scientific support. A number of alternative methods have therefore been developed to estimate GHG emissions based on site characteristics and land use information (so-called activity data).

This research report begins by explaining the influence of site factors and land use on the processes occurring in peatlands and the associated GHG fluxes. The methods of various peatland protection project standards and national and corporate GHG reporting are then analysed with regard to their similarities and differences. Based on this, political decision-makers and the specialist public can critically categorise and differentiate the GHG accounting approaches. The analysis also shows the potential and limitations of linking different data and methods.

The determination of GHG emissions from peatlands requires their **differentiation from other areas or soil types**. The central characteristic of peatland soils is the presence of a peat layer on or near the surface. A soil substrate is described as peat if it is sedentarily accumulated, and the organic matter content exceeds an internationally non-standardised threshold value. Another defining characteristic is the thickness of the peat layer. There are also different international minimum requirements in this respect.

GHG emissions from peatlands are determined by a large number of simultaneous **processes**. Some lead to the emission of GHGs into the atmosphere, others to their sequestration. The occurrence and intensity of the processes depends on the characteristics of certain **site characteristics and land use** (=activity data).

The presence or absence of **water** has the strongest influence on GHG emissions from peatlands, as this affects the availability of oxygen in the soil (Evans et al., 2021; Wilson et al., 2016). The water table depth is often used as an indicator of the oxygen availability in a peatland soil. This corresponds to the distance between the water-saturated area of the soil and the soil surface. While carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) are primarily emitted under oxic conditions (oxygen is available) (Evans et al., 2021; Leppelt et al., 2014), methane (CH₄) is released under anoxic conditions (no oxygen available) (Turetsky et al., 2014).

The **peat thickness** influences GHG emissions because, in combination with storage density and carbon content, it determines the amount of carbon stored in peatland soils (Roßkopf et al., 2015). In the case of drained peatlands, the peat thickness can be used to determine the remaining time until the organic matter of a peat body has completely decomposed (peat depletion time).

Of the nutrients found in peat soils, **nitrogen** has the greatest influence on GHG emissions. There is a positive correlation between the nitrogen content and N₂O (Leppelt et al., 2014; Tiemeyer et al., 2016) as well as CO₂ emissions (Nielsen et al., 2023; Tiemeyer et al., 2016).

The **pH value** of the soil is primarily cited in the literature as an important factor influencing N₂O emissions. The lower the pH value, the higher the N₂O emissions (Leppelt et al., 2014).

The climatic parameters of **precipitation, temperature and light intensity** also influence the GHG emissions of peatlands. Precipitation affects the groundwater table and soil moisture. If a drained peatland soil has sufficient soil moisture, both the intensity of carbon sequestration through photosynthesis and carbon mineralisation are significantly more pronounced at higher temperatures and a higher light intensity.

Vegetation influences the GHG fluxes in peatlands in multiple ways. It sequesters CO₂ in the course of photosynthesis. Some species enhance CH₄ emissions by facilitating its transport. At the same time, vegetation influences microbial activity in the soil by providing easily degradable biomass and excreting root exudates.

The **anthropogenic utilisation** of peatlands for agricultural and forestry purposes or as infrastructure or settlement areas actively influences the site characteristics of a peatland and thus the GHG emissions.

The comprehensive estimation of an area's GHG emissions requires **comprehensive information on the relevant activity data** (site characteristics and land use). While data can be collected locally for smaller areas, supra-regional approaches usually have to rely on already available data sets. Abiotic site characteristics such as the water table depth or the nutrient content in the soil can be measured directly as part of on-site investigations. However, this only provides point information. In order to transfer this information to the area, additional parameters that can be recorded over an area must be used (vegetation, terrain model). Both the point-based and area-based determination of site characteristics is based on cost-intensive procedures. Existing data sets are therefore preferred if this is possible without compromising the desired accuracy. Data on the extent of peatlands, their thickness and type, as well as the type of biotope and land use are available at national level for supra-regional analyses. Due to the central influence of the water table depth on GHG emissions from peatlands, a model was developed for its supra-regional estimation in Germany (Bechtold et al., 2014).

The **GHG emissions of a peatland area are generally estimated** on the basis of the activity data collected. This is done either by categorising sub-areas into emission classes or by using certain activity data in statistical or process-based models. To determine the average GHG emissions of an emission class, GHG measurements that are representative of an emission class are used. The results are so-called emission factors. Emission factors indicate the average net emissions of each GHG per hectare in a given year. These must be multiplied by the total area of a sub-area.

GHG emissions from peatlands are recorded in different contexts and for different purposes. In general, three types of GHG accounting approaches can be distinguished.

1. At national level, GHG emissions are recorded for the preparation of **national GHG inventory reports** in accordance with the Framework Convention on Climate Change. These

aim to document and account for progress in achieving national GHG emission reduction targets towards the international community. This study analyses both the international guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and their design in Germany (UBA, 2024b).

2. **Peatland protection projects** are aimed at reducing GHG emissions. The transparent quantification of the achievable emission reductions is essential for such projects, as it forms the basis for attracting public and private funding. From the large number of standards, the German regional standards "MoorFutures", "Moorland" and "Moorbenefits 2.0", the "Peatland Carbon Code" (PCC) widely used in the UK and the VM0036 methodology of the international "Verified Carbon Standard" (VCS) are considered as examples.
3. **Companies** report the GHG emissions they cause, among other things, in order to be able to report publicly on climate protection efforts and fulfil legal obligations. The Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) is the most widely used private, transnational standard for GHG reporting by companies and increasingly also by public authorities. GHG emissions from peatlands can already be reported under the GHG Protocol. A detailed guideline for reporting is currently under development (WRI & WBCSD, 2022a).

The different purposes of the GHG accounting approaches result in differences in the **time perspective** adopted in each case. Both national and corporate GHG reporting take a past-oriented perspective. They look at GHG emissions that have already been emitted and record them in regularly published reports. In contrast, the project standards are future oriented. Here, the focus is on estimating the potential GHG emission reduction of planned projects and comparing it with the actual reduction achieved after project implementation.

If GHG emission reductions are determined in corporate and national GHG reporting, the emissions of a current period are compared with those of a past period. In contrast, two future-oriented scenarios are developed in peatland protection projects to estimate GHG emission reductions. In a reference scenario, the development of GHG emissions is projected without the implementation of peatland protection measures. In a project scenario, the development of GHG emissions is projected with the implementation of measures. The quantification of GHG emission reductions is based on the comparison of both scenarios.

The GHG accounting approaches are applicable in different regions. Both the national GHG reporting standards and the GHG Protocol are globally applicable. In contrast, the analysed peatland protection project standards have a limited **area of application**. It is restricted either to a climate zone, a country or a region within a country.

The **size of a study area** also differs. While the national GHG inventory covers the entire peatland area of a country, corporate GHG reporting only covers the areas directly (Scope 1) and indirectly (Scope 2/3) controlled by the reporting company. Peatland protection projects consider project areas, which can be 5 to several thousand hectares in size.

If the same area is analysed using two GHG accounting approaches, the area taken into account may differ due to different **peatland definitions**. For national GHG reporting, the IPCC has adapted the FAO definition of organic soils (IPCC, 2006, Annex 3A.5). In addition to this definition, national peatland definitions may be used. The peatland soil definition of the FAO adapted by the IPCC is also referenced in the GHG Protocol. Whether the use of other definitions is possible remains open. Peatland protection project standards do not specify the minimum organic matter content, but often specify the minimum peat thickness. In the case of peatland protection projects, the projection of potential GHG emission reductions in the longer term depends largely on the amount of carbon remaining in the soil. The requirements for recording

minimum peat thickness as an indicator of the amount of carbon stored are therefore higher than those for national and corporate GHG reporting.

The requirements for **land use prior to rewetting** also differ between the approaches. While the GHG Protocol and national GHG reporting require all managed peatlands to be taken into account, the project standards refer to specific forms of utilisation or exclude certain forms.

Each GHG accounting approach has its own set of rules in which the **methodological requirements** for accounting GHG emissions from peatlands are set out. The degree of differentiation of the requirements varies depending on the area of application and purpose of the respective approach.

The GHG Protocol represents a very broadly applicable standard for corporate GHG reporting. The methodological requirements regarding the accounting of GHG emissions from peatlands are therefore formulated in relatively general terms.

The IPCC Guidelines are to be used for national GHG reporting. The IPCC distinguishes between three levels of methodological accuracy (Tier approaches) (IPCC, 2006, Vol. 1, Chapter 1). While Tier 1 and Tier 2 approaches are static approaches based on the categorisation of peatlands into classes with a fixed emission factor (emission classes), Tier 3 approaches are dynamic models that can also map gradual changes in activity data (IPCC, 2006, Vol. 4, Ch. 2).

The peatland protection project standards define the GHG accounting method to be used most precisely. This applies both to the defined requirements for the collection of activity data, which predominantly takes place in the field, and to the emission classes and statistical models to be used.

The estimation of GHG emissions from peatlands is based on **activity data** in all the GHG accounting approaches analysed. Both the peatland protection project standards and the national GHG reporting standards define which activity data are to be recorded and how. Only the GHG Protocol leaves open the activity data to be taken into account and how it is to be recorded.

In addition to the **climatic situation**, all GHG accounting approaches take into account the **water table depth** as an influencing factor on GHG emissions. The average water table depth is incorporated with centimetre precision into the model based GHG estimation of the Moorbenefits 2.0 and PCC project standards and the national GHG reporting of Germany. In MoorFutures and VCS, it can be used to verify identified vegetation types. In the absence of vegetation, it is also used to directly estimate GHG emissions. The Tier 1 approach of national GHG reporting only distinguishes between shallow and deeply drained peatlands.

Both **land use and vegetation** are taken into account as additional parameters by all approaches. For national GHG reporting and the Moorbenefits 2.0 and PCC project standards, a rough land use categorisation is used to estimate GHG emissions. More precise differences in vegetation are recorded under the MoorFutures, Moorland and VCS project standards.

Soil parameters such as nutrient content or pH value are only used to a limited extent to estimate GHG emissions in the analysed approaches. They are taken into account indirectly by recording land use and vegetation.

GHG emissions are estimated in two ways in the analysed approaches. The Tier 1 minimum standard for national GHG reporting and the project standards MoorFutures, Moorland, VCS and PCC (for raised bogs) divide a study area into homogeneous sub-areas based on the recorded activity data. Each area is assigned to an emission class with predefined emission factors. In the national GHG reporting of Germany and in the project standards Moorbenefits 2.0 and PCC (for

fens), the emission of individual greenhouse gases is explicitly determined spatially and, in some cases, temporally on the basis of statistical models.

In all approaches, the net CO₂ emissions and the CH₄ emissions of the area must be estimated. For national and corporate GHG reporting, CH₄ emissions from ditches, N₂O emissions as well as the leaching of carbon (dissolved organic carbon, DOC) must additionally be taken into account. Some peatland protection project standards conservatively disregard these emissions.

As a result of the **methodological differences** in the definition of peatland soils, the consideration and recording of activity data as well as the estimation of GHG emissions **none of the approaches can be transferred to other approaches without adjustments**.

The comparability of the GHG accounting approaches is further complicated by the fact that national GHG reporting aims to estimate net GHG emissions **as realistically as possible**, whereas both the GHG Protocol and the peatland protection project standards follow the **principle of conservatism**: The GHG Protocol tends to overestimate emissions and underestimate GHG sequestration. In the case of peatland protection projects, emission reductions are underestimated.

To **illustrate the differences** between the GHG accounting approaches, the GHG emissions of an exemplary selected project area are estimated. This is done using the methods of the peatland protection project standards MoorFutures and PCC as well as the German approach and the minimum standard (Tier 1) of national GHG reporting. The estimated GHG emissions for the almost 55-hectare area range from approx. 600 tonnes CO₂eq per year to 1,600 tonnes CO₂eq per year. The significant difference results in particular from the widely differing estimates of CO₂ emissions.

The simple calculation example illustrates that the climate protection successes achieved in the context of peatland protection projects cannot be counted towards the national climate targets in the amount quantified for the project. The same applies to the GHG emissions and sequestration accounted at corporate level.

Despite the major differences, the **transfer of certain methodological elements** can increase the accuracy of another approach or reduce the data collection effort. There is potential, for example, in the exchange of collected activity data. In addition, the use of statistical models used for national GHG reporting could improve the accuracy of primarily vegetation-based methods (e.g. GESTs for MoorFutures) in the case of large water table depths and reduced species diversity. Furthermore, increased comparability could be achieved by harmonising the peatland definitions used worldwide.

Even if the emission estimates of different accounting approaches can currently still differ greatly and are subject to uncertainties, there is a **consensus** that GHG emissions from drained peatlands are high and that a rapid reduction in emissions can only be achieved through early rewetting. Targeted action by all stakeholders is possible on the basis of existing methods. The refinement of GHG accounting approaches should not be at the expense of rewetting efforts.

1 Einleitung

Naturnahe Moore⁸ tragen zum Erhalt von Biodiversität bei, haben einen positiven Einfluss auf die Regulierung des Landschaftswasserhaushaltes und fungieren durch Torfbildung als Kohlenstoffsенke (Joosten et al., 2012). Der zunehmende Nahrungs- und Energiebedarf führte vor allem seit dem 18. Jahrhundert dazu, dass fast alle Moore Deutschlands für die landwirtschaftliche Nutzung und den Torfabbau entwässert wurden (Jeschke & Joosten, 2003). Die Entwässerung führt zu einem fortschreitenden Abbau des im Moor abgelagerten Torfes und macht Moore von einer Netto-Treibhausgas-(THG-)senke zu einer maßgeblichen Quelle. 2022 waren Moore und Anmoore mit einer Fläche von 1,8 Mio. ha für etwa 54 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxidäquivalente (t CO₂eq) verantwortlich. Das entspricht 7 % der gesamten deutschen THG-Emissionen (UBA, 2024a).

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels, dem Übereinkommen von Paris (ÜvP) und den THG-Neutralitätszielen der EU bis 2050 und Deutschlands bis 2045 rückt die Reduktion der THG-Emissionen aus entwässerten Mooren in den Vordergrund des moorpolitischen Handelns (BMUV, 2022, 2023; European Parliament & European Council, 2023). Die Wiedervernässung von Mooren, also die Anhebung der Wasserstände auf Oberflächenniveau, ist das zentrale Instrument zur weitgehenden Reduktion dieser Emissionen. Darüber hinaus kann ein wiedervernässstes Moor oft langfristig erneut CO₂ aus der Atmosphäre festlegen und sich zu einer THG-Senke entwickeln.

Einfache Überschlagsrechnungen zeigen, dass eine weitgehende Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moore volkswirtschaftlich sinnvoll ist: Der klimapolitische Nutzen übersteigt die Kosten deutlich (Grethe et al., 2021). Trotzdem wird das Potential der Emissionsreduktion durch Moorwiedervernässung bisher wenig ausgeschöpft. Von der fast 1,8 Mio. ha großen Fläche entwässerter Moore in Deutschland wurden seit den 1980er Jahren etwa 70.000 ha vollständig wiedervernässt (Barthelmes et al., 2021). Dieser geringe Anteil erklärt sich aus einer Reihe von umweltrechtlichen, wirtschaftlichen, sozialen und technischen Hemmnissen, deren Überwindung kollektives Handeln und politische Gestaltungsbereitschaft erfordert (Nordt et al., 2022; Wichmann & Nordt, 2024).

Die Wiedervernässung von Mooren beinhaltet zahlreiche Finanzierungsherausforderungen. Dazu gehören die Umsetzung von wasserbaulichen Maßnahmen, die Gestaltung von partizipativen Prozessen in den Moorregionen, sowie die Stärkung entsprechender Verwaltungs- und Umsetzungsstrukturen. Zentral ist der Aufbau neuer Einkommensmöglichkeiten und Wertschöpfungsketten, denn die gängigen land- und forstwirtschaftliche Nutzungsformen sind auf Moorböden bei hohen Wasserständen nicht mehr möglich (Birr & Luthardt, 2021). Nasse Landnutzungsalternativen wie Paludikulturen (Schilf, Rohrkolben, Torfmoos etc.) sind bisher betriebswirtschaftlich nicht attraktiv (Schäfer et al., 2022), weil entsprechende Wertschöpfungsketten und klimapolitische Anreizinstrumente noch unzureichend entwickelt sind. Um zügig in die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Mooren einzusteigen, ist es allerdings erforderlich, Landeigentümer*innen und -besitzer*innen verlässlichere und attraktivere Einkommensquellen zu bieten, als die der entwässerungsbasierten Moornutzung (Grethe et al., 2021).

Für einen Übergangszeitraum können Einkommensverluste z. B. durch vom Staat gezahlte Wiedervernässungsprämien ausgeglichen werden. Neben staatlichen Förderprogrammen stellt

⁸ In dieser Veröffentlichung werden die Begriffe Moor und Moorboden synonym für all jene Gebiete verwendet, die der in der deutschen THG-Berichterstattung verwendeten Definition kohlenstoffreicher Böden entsprechen. Eine Auseinandersetzung mit der Moordefinition erfolgt in Kapitel 2.1.

auch der Kohlenstoffmarkt eine Finanzierungsquelle für Moorwiedervernässung dar. Mittlerweile haben sich privatwirtschaftlich organisierte Initiativen etabliert, welche Zertifikate für die Reduktion von Emissionen aus Mooren für den freiwilligen Markt erzeugen und vertreiben (z. B. Verra, MoorFutures, Peatland Carbon Code). Auch die Einbeziehung von Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in einen verpflichtenden EU-Emissionshandel wird diskutiert.

Unerlässlich für die privatwirtschaftliche wie staatliche Honorierung öffentlicher, der Allgemeinheit zugutekommender Leistungen – in diesem Fall THG-Emissionsreduktionen – und den erfolgreichen Handel mit THG-Zertifikaten ist eine transparente und möglichst korrekte Projektion der THG-Emissionsreduktionen vor Beginn einer Moorschutzmaßnahme und ein Monitoring der Zielerreichung im Nachhinein. Dies sichert eine effiziente Mittelverteilung und erhöht die Glaubwürdigkeit des Zertifikatehandels.

Eine exakte Quantifizierung der THG-Emissionen aus Mooren stellt unabhängig vom Zeitpunkt eine große Herausforderung dar. Dies liegt an der Vielzahl ablaufender THG-Emissions- und Einbindungsprozesse und den hohen Kosten, die mit ihrer direkten Messung verbunden sind. Aus diesem Grund wurde eine Reihe alternativer Methoden entwickelt, mit denen THG-Emissionen auf der Basis von Standort- und Landnutzungsinformationen abgeschätzt werden können.

Neben der ergebnisbasierten Honorierung öffentlicher Leistungen ist auch der nationale THG-Inventarbericht ein Grund für die Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren. Der nationale THG-Inventarbericht dient als Fortschrittsnachweis für die Erreichung international vereinbarter Klimaziele. Durch die Ratifizierung des Kyoto Protokolls bzw. des ÜvP haben sich nahezu alle Staaten der Erde zur regelmäßigen Anfertigung eines solchen Berichtes verpflichtet (Art. 3 Kyoto Protocol; Art. 4 (2) ÜvP (United Nations, 2015)).

Das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) ist der am weitesten verbreitete private transnationale Standard für die freiwillige THG-Berichterstattung von Unternehmen und zunehmend auch von öffentlichen Instanzen (Kasperzak et al., 2023). Die THG-Emissionen aus Mooren können bereits heute unter dem GHG Protocol erfasst werden. Eine detaillierte Richtlinie zur Erfassung befindet sich derzeit in der Entwicklung (WRI & WBCSD, 2022a).

Im Rahmen dieses Forschungsberichtes werden ausgewählte THG-Erfassungsansätze für Moorklimaschutzprojekte, nationale THG-Inventarberichte und die unternehmerische THG-Berichterstattung hinsichtlich ihrer methodischen Anforderungen an die Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren miteinander verglichen. Dieser Vergleich soll politischen Entscheidungsträger*innen und der Fachöffentlichkeit eine bessere Orientierung bezüglich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ansätze und deren Gründen ermöglichen. Darüber hinaus wird geprüft, inwieweit es Potenziale für die Verknüpfung unterschiedlicher Daten und Methoden gibt. Die folgenden Fragen werden beantwortet:

- ▶ Welche Parameter beeinflussen die THG-Emissionen aus Mooren?
- ▶ Auf welche Weise lassen sich diese Parameter erfassen und auf ihrer Grundlage die THG-Emissionen eines Mooregebietes abschätzen?
- ▶ Welchen Zweck verfolgen die unterschiedlichen THG-Erfassungsansätze und ist die angewandte Methodik dafür geeignet?
- ▶ Weshalb führen die Erfassungsmethoden zu unterschiedlichen Ergebnissen? Gibt es qualitative Unterschiede zwischen den THG-Erfassungsansätzen?

- ▶ Können Ergebnisse eines THG-Erfassungsansatzes in einen anderen Ansatz integriert werden?
- ▶ Können Ergebnisse eines THG-Erfassungsansatzes für die Zwecke genutzt werden, denen ein anderer Ansatz dient?

Zunächst wird eine Einführung in die Parameter, die die THG-Emissionen aus Mooren beeinflussen und die Möglichkeiten ihrer Erfassung gegeben (Kapitel 2). Nach der Präsentation der drei THG-Erfassungsansätze (Kapitel 3), werden ihre methodischen Unterschiede durch die Berechnung der THG-Emissionen einer konkreten Fläche veranschaulicht (Kapitel 4).

Der Forschungsbericht beschränkt sich auf den Gasaustausch des Bodens und der Vegetation. Bei der Bilanzierung werden Biomasseabtransporte und Kohlenstoffauswaschungen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden THG-Emissionen, die bei der Bewirtschaftung (z. B. CO₂-Emissionen aus dem Betrieb von Landmaschinen) und Beweidung (z. B. CH₄-Emissionen von Wiederkäuern) anfallen, sowie Emissionsminderungen durch den Ersatz fossiler Energieträger durch von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen auf Mooren erzeugter Energie. Auch klimawirksame Effekte, die aus einer Veränderung des Reflexionsvermögens des Bodens/der Vegetation (Albedo) oder der geänderten Bodenfeuchtigkeit bzw. der Evapotranspiration resultieren, werden nicht betrachtet. Zudem werden Klimaeffekte, die aus der Substitution fossiler Rohstoffe durch Biomasse aus nasser Moornutzung resultieren, nicht berücksichtigt.

2 Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren

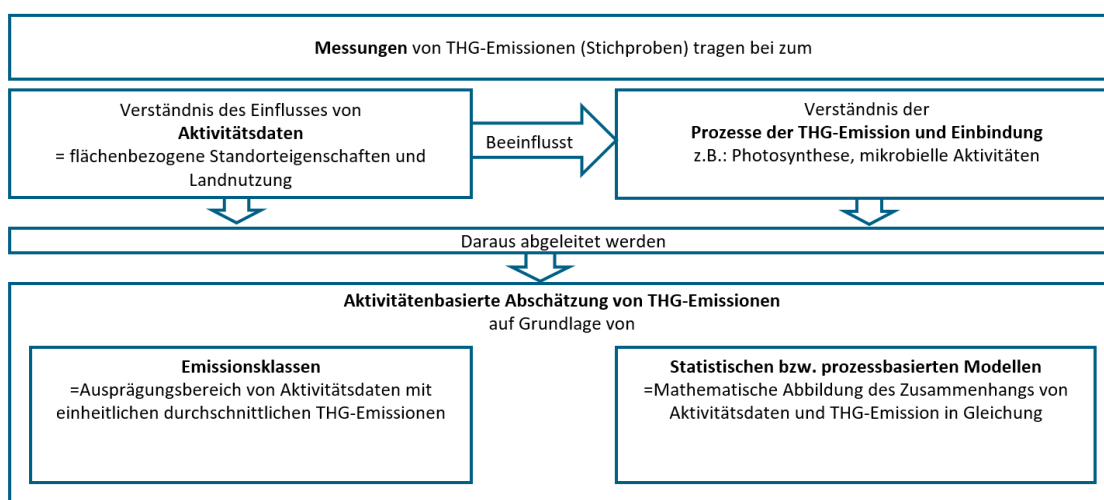
Moor- und Moorfolgeböden bedecken lediglich 3 % der globalen Landfläche, stellen allerdings den größten Kohlenstoffspeicher der terrestrischen Biosphäre dar (UNEP, 2022). Ihre Entwässerung ändert die Moore von kohlenstoffakkumulierenden in netto THG-emittierende Ökosysteme (Joosten et al., 2017). Entwässerte Moore emittieren bei gleichbleibender Nutzung kontinuierlich große Mengen Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Lachgas (N₂O) aus ihren entwässerten Teilen und Methan (CH₄) aus den Gräben. Dies unterscheidet sie von Mineralböden, in denen sich bei konstanter Nutzung ein Kohlenstoffgleichgewicht einstellt.

Eine möglichst exakte und flächendeckende Abschätzung der THG-Emissionen aus Mooren ist erforderlich,

- um die Klimawirkung von Moorböden in THG-Inventaren zu erfassen und ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele zu berücksichtigen,
- um die Klimawirkung einzelner Unternehmen und Institutionen im Hinblick auf deren Moornutzung darstellen zu können,
- um standortangepasste Klimaschutzmaßnahmen effizient zu entwickeln, zu finanzieren und zu überprüfen.

Umfangreiche Forschung in den vergangenen Jahrzehnten hat gezeigt, dass die Prozesse der THG-Emission und Einbindung und damit die Höhe der THG-Emissionen aus Mooren maßgeblich von ihren flächenbezogenen Eigenschaften, den sogenannten „Aktivitätsdaten“ abhängen. Die untersuchten THG-Erfassungsansätze greifen auf die identifizierten Zusammenhänge zurück. Sie werden daher vor der Analyse der einzelnen THG-Erfassungsansätze vorgestellt. Außerdem wird zunächst auf allgemeiner Ebene dargelegt, wie Aktivitätsdaten effizient erfasst werden können und wie auf Grundlage dessen die THG-Emissionen aus Mooren abgeschätzt werden können. Hinsichtlich der Abschätzung von THG-Emissionen wird zwischen der aktivitätsdatenbasierten Einordnung von Moorflächen in Emissionsklassen mit einheitlichen durchschnittlichen THG-Emissionen und der individuellen modellbasierten Berechnung der THG-Emissionen unterschieden (Abbildung 1).

Abbildung 1: Überblick: Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren



Quelle: Eigene Darstellung

2.1 Abgrenzung von Moorböden

Die Einordnung der THG-Emissionen aus Mooren erfordert zunächst eine Abgrenzung der Moorböden von anderen Böden.

- ▶ Das zentrale Charakteristikum von Moorböden ist das **Vorhandensein einer Torfschicht** an oder nah an der Oberfläche. Torf ist eine Ablagerung von Pflanzenteilen, die sich durch eine annähernd dauerhafte Wassersättigung des Bodens nicht vollständig abgebaut haben. Torf ist eine „sedentäre“ Ablagerung, d.h. eine Ablagerung von Material, an der Stelle, an der es sich gebildet hat. Dies steht im Gegensatz zu einem „Sediment“, dessen konstituierenden Teile vom Wind, Wasser oder Organismen von einem anderen Ort zugeführt wurden. Weil sich der Kohlenstoff in den Pflanzenresten bei Zersetzung relativ anreichert (es geht mehr Sauerstoff und Wasserstoff aus dem Pflanzenmaterial verloren als Kohlenstoff) besteht die organische Fraktion des Torfes zu mehr als der Hälfte aus Kohlenstoff (Joosten et al., 2017).

Neben organischem Material kann Torf auch mineralische Bestandteile enthalten. Es handelt sich dabei um Sand, Schluff oder Ton, der während der Torfablagerung eingeweht oder eingespült wird sowie um Kalk und Eisen, das mit dem Grundwasser in die Ablagerung gelangt. Der Anteil an organischer Substanz eines Bodenhorizontes wird standardmäßig als ein Prozentsatz der Gesamttrockenmasse ausgedrückt. **Ein Bodensubstrat wird als Torf bezeichnet, wenn es sedentär abgelagert ist und der Anteil organischer Substanz einen (international nicht standardisierten) Schwellenwert übersteigt.**

Mineralische Bodenbestandteile haben eine weitaus größere Trockenmasse (sind schwerer) als organisches Material (Sand ist z. B. 3x schwerer als Holz). Dies führt zu der kontra-intuitiven Situation, dass Böden mit einem geringeren Anteil organischer Substanz (z. B. 20 %) mitunter eine größere Menge organischer Substanz je Volumeneinheit enthalten als Böden mit einem hohen Gehalt organischer Substanz (z. B. 95 %) (Vernimmen et al., 2020). Die standardmäßige Verwendung des *Anteils* an organischer Substanz zur Charakterisierung der Klimawirkung eines Bodens ist somit suboptimal, weil die Menge an potentiell freisetzbarem CO₂ nicht unmittelbar mit dem *Anteil* organischer Substanz zusammenhängt, sondern viel mehr mit dessen *Menge* (Tiemeyer et al., 2016).

- ▶ Eine zweite definierende Eigenschaft ist die **Mächtigkeit der Torfschicht**. Das verwendete Maß ist ursprünglich auf die historische Landbewirtschaftungstiefe (Pflugtiefe) zurückzuführen (Tanneberger et al., 2017). Hinsichtlich des Moorschutzes ist festzuhalten, dass die gegenwärtigen THG-Emissionen auch bei geringen Mächtigkeiten hoch sind. Sie enden jedoch früher, weil der Torf durch den geringeren Vorrat schneller erschöpft ist.

Nachfolgend werden **zwei Definitionen** gegenübergestellt, welche die unterschiedlichen Kriterien verdeutlichen.

Auf internationaler Ebene ist die **Definition organischer Böden der** (FAO, 1998) von besonderer Relevanz, da sie die Grundlage der nationalen THG-Berichterstattung im Rahmen des nationalen THG-Inventarberichtes bildet (IPCC, 2006, Annex 3A.5; siehe Kapitel 3.1.1). Diese Definition *organischer Böden* ist breiter als reine *Moorboden* Definitionen, weil sie auch Böden ohne die für Moorböden charakteristische sedentäre Genese umfasst.

Der Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC (2006)) bezeichnet Böden als organisch, wenn die folgenden Kriterien 1 und 2 *oder* 1 und 3 erfüllt sind:

1. Die Mächtigkeit des organischen Horizonts ist größer oder gleich 10 cm. Ein Horizont von weniger als 20 cm muss einen Anteil von 12 Prozent oder mehr organischen Kohlenstoff aufweisen, wenn er bis zu einer Tiefe von 20 cm gemischt ist.
2. Böden, die nie länger als ein paar Tage mit Wasser gesättigt sind, müssen mehr als 20 Gewichtsprozent organischen Kohlenstoff enthalten (d. h. etwa 35 Prozent organische Substanz).
3. Böden, die episodisch mit Wasser gesättigt sind, haben entweder:
 - a. Mindestens 12 Gewichtsprozent organischen Kohlenstoffs (d. h. etwa 20 Prozent organische Substanz), wenn der Boden keinen Ton enthält; oder
 - b. Mindestens 18 Gewichtsprozent organischen Kohlenstoffs (d. h. etwa 30 Prozent organische Substanz), wenn der Boden 60 % oder mehr Ton enthält; oder
 - c. Ein dazwischenliegender, proportionaler Anteil an organischem Kohlenstoff bei dazwischen liegenden Tonanteilen.

Wenn ein Land entsprechend seinen nationalen Gegebenheiten eine andere Definition des organischen Bodens verwendet, soll das Konzept des organischen Bodens (und seiner möglichen Unterteilungen) klar definiert sein und die Definition sowohl auf der gesamten nationalen Landfläche als auch im Zeitverlauf einheitlich angewandt werden.

Die in Deutschland gebräuchliche **Bodenkundliche Kartieranleitung** (Eckelmann et al., 2005) definiert einen Boden als Moorboden, wenn

- ▶ der Boden einen Horizont enthält, der zu mindestens 30 Gewichtsprozent aus organischer Bodensubstanz besteht
- ▶ und dieser sogenannte Torfhorizont eine Mächtigkeit von mindestens 30 cm aufweist
- ▶ und um höchstens 20 cm von einem mineralischen Bodenhorizont überlagert ist.

In der deutschen THG-Berichterstattung werden bei der Erfassung von THG-Emissionen aus kohlenstoffreichen Böden zusätzlich die Bodentypen des An- und Abmoores mitberücksichtigt. Dies trägt der oben beschriebenen Problematik von nicht auf THG-Emissionen abgestimmten Moorbodendefinitionen Rechnung. Wenn Böden die Kriterien eines Moorbodens noch nicht (Anmoore) bzw. aufgrund voranschreitender Abbauprozesse nicht mehr (Abmoore) erfüllen aber dennoch einen erhöhten Kohlenstoffgehalt aufweisen, wird ihnen dasselbe THG-Emissionsverhalten wie Moorböden zugesprochen (Tiemeyer et al., 2016). Zu den An- bzw. Abmooren werden Böden mit Torfhorizonten von 10 bis 30 cm sowie Böden mit aus 15 bis 30 Gewichtsprozent organischer Bodensubstanz bestehenden Oberbodenhorizonten gezählt (Eckelmann et al., 2005; Wittnebel et al., 2023).

Vergleichend lässt sich sagen, dass in der deutschen THG-Berichterstattung ein breiteres Spektrum an Böden zu den kohlenstoffreichen Böden mit hohen THG-Emissionen zugeordnet wird, als in der Definition des IPCC. Dies gilt sowohl für die Mindestmächtigkeit eines kohlenstoffreichen Horizontes (D: 10 cm; IPCC: nur unter bestimmten Bedingungen 10 cm) als auch für den Mindestkohlenstoffgehalt (D: ca. 8 %; IPCC: 12-20 %). Eine allumfassende Analyse der existierenden Definitionen führt an dieser Stelle zu weit. Die Gegenüberstellung der beiden Definitionen zeigt dennoch, dass definitorische Unterschiede bei der Beurteilung der von unterschiedlichen Akteuren berichteten THG-Emissionen mitberücksichtigt werden müssen.

In dieser Veröffentlichung werden die Begriffe *Moor* und *Moorboden* synonym für all jene Gebiete verwendet, die der in der deutschen THG-Berichterstattung verwendeten Definition kohlenstoffreicher Böden entsprechen.

2.2 Einfluss von Standorteigenschaften und Landnutzung auf Prozesse der Emission und -Einbindung von Treibhausgasen

Die Abschätzung der THG-Emissionen aus Mooren (Kapitel 2.3) basiert auf dem Einfluss verschiedener Standorteigenschaften und Landnutzungsaktivitäten (Kapitel 2.2.2) auf die in Mooren ablaufenden Prozesse der Emission und Einbindung von Treibhausgasen (Kapitel 2.2.1). Die Erfassung von Standorteigenschaften und Landnutzungsaktivitäten kann auf verschiedene Weisen erfolgen (Kapitel 2.2.3).

2.2.1 Ablaufende Prozesse

Die THG-Emissionen aus Mooren werden von einer Vielzahl zeitgleich ablaufender Prozesse bestimmt. Einige führen zur Emission von THG in die Atmosphäre, andere zu deren Einbindung.

- ▶ Die **Einbindung von CO₂** aus der Atmosphäre geschieht **durch Photosynthese**. Dabei wird CO₂ unter Einfluss von Licht und mithilfe von Wasser unter Freisetzung von Sauerstoff in organisches Material umgesetzt. Eine hohe Belichtung, hohe Temperaturen sowie eine gute Nährstoff- und Wasserversorgung begünstigen die Photosynthese und damit die Bildung von Biomasse und die Einbindung von CO₂. Der übergroße Teil der Biomasse wird – auch in ungenutzten lebenden Mooren – schnell wieder abgebaut (oxidiert) und kehrt als CO₂ zurück in die Atmosphäre. Nur ein Bruchteil der organischen Masse (~ 10 % der Netto-Jahresproduktion) bleibt in lebenden Mooren durch Wassersättigung und Sauerstoffabschluss unterirdisch langfristig als Torf gebunden.
- ▶ Wenn die aufgewachsene oberirdische Biomasse mittels **Beweidung oder Ernte** genutzt wird, wird sie nicht auf der Fläche, sondern außerhalb des Moores abgebaut. Dabei ändern sich die Stoffflüsse mengenmäßig nicht, sie werden lediglich umgeleitet und anders genutzt: Anstelle von Mikroben im Moor profitieren Kühe oder Menschen von der Energie und den Nährstoffen, die in der Biomasse enthaltenen sind. Die Abtransporte werden daher bei der THG-Bilanzierung unter der Annahme, dass der abtransportierte Kohlenstoff zu einem späteren Zeitpunkt in Form von CO₂ wieder freigesetzt wird, mitberücksichtigt. Weil dieses CO₂ dem LULUCF-Sektor (Land Use, Land Use Change and Forestry, im Folgenden zur besseren Lesbarkeit: Landnutzungssektor) zugerechnet wird, wird Biomasse im Energiesektor als kohlenstoffneutral betrachtet. Die Umsetzung von Biomasse in CH₄ (z. B. bei der Verdauung durch Wiederkäuer oder bei Verbrennung) wird im Landnutzungssektor nicht berücksichtigt, sondern den Sektoren in denen sie anfallen (Landwirtschaft, Energie) zugerechnet (Tiemeyer et al., 2016).
- ▶ Auch die **Auswaschung von organischem Kohlenstoff** (DOC, dissolved organic carbon) aus einer Moorfläche wird bei der THG-Bilanzierung mitberücksichtigt, und es wird davon ausgegangen, dass dieser Kohlenstoff - ähnlich wie die abtransportierte Biomasse - zu einem späteren Zeitpunkt an einem anderen Ort in Form von CO₂ freigesetzt wird. Diese Emission wird der entsprechenden Landnutzungsaktivität zugerechnet. Die Intensität der Auswaschung hängt unter anderem von der Intensität des Wasserflusses ab (Tiemeyer et al., 2017).
- ▶ Für die Entstehung von THG im Moorboden sind weitgehend **Mikroorganismen** verantwortlich. Die mikrobielle Umsetzung von im organischen Material gebundenem

Kohlenstoff und Stickstoff führt zur **Emission der Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O**. Dabei ist die An- bzw. Abwesenheit von Sauerstoff oder anderen Elektronenakzeptoren entscheidend. Bei Sauerstoffverfügbarkeit sind Mikroorganismen aktiv, deren Stoffwechselprozesse auf freiem Sauerstoff basieren. Im Fall eines wassergesättigten Bodens herrschen anoxische, d.h. sauerstofflose Bedingungen vor. Hier greifen speziell an diese Bedingungen angepasste Mikroben auf andere Elektronakzeptoren als Ersatz für den fehlenden Sauerstoff zurück. Die Mikroben verwenden stufenweise Elektronenakzeptoren mit abnehmender energetischer Effizienz. In der letzten Stufe setzen spezialisierte Mikroorganismen, Pflanzenmaterial mit anderem Pflanzenmaterial um und produzieren dabei CH₄. Neben der Sauerstoffverfügbarkeit beeinflussen die Temperatur, die Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit ebenso wie der pH-Wert des Bodens die mikrobielle Aktivität und somit die Höhe der THG-Emissionen (Höper, 2007).

- ▶ Auch die an nasse Bedingungen angepassten **Pflanzen** haben einen direkten Einfluss auf die THG-Emissionen der Moore. Konkret handelt es sich um Pflanzen mit einem Aerenchymgewebe („shunt species“). Durch dieses Gewebe transportieren die Pflanzen Sauerstoff aus der Atmosphäre zu den Wurzeln und transportieren im Austausch CH₄ ab.

Die Vielzahl stattfindender Prozesse und ihre von zahlreichen Faktoren abhängige Intensität führt dazu, dass die THG-Emissionen von Moorstandorten in Zeit und Raum variieren. **Jeder Standort weist ein eigenes Emissionsverhalten auf, welches nur durch kontinuierliche und kleinräumige THG-Messungen präzise abgebildet werden kann.** Über ausgewählte Forschungsflächen hinaus ist die direkte Messung von THG-Emissionen allerdings nicht darstellbar, da sie hohe Kosten für Technik und Personal verursacht und ein umfangreiches Fachwissen erfordert (Tiemeyer et al., 2017). Für die Abschätzung von THG-Emissionen wird daher auf Aktivitätsdaten zurückgegriffen.

2.2.2 Aktivitätsdaten – Standorteigenschaften und Landnutzung

Die Einschätzung der THG-Emissionen von Mooren geschieht oftmals auf Grundlage von Aktivitätsdaten und darauf bezogenen Emissionsfaktoren.

Aktivitätsdaten

Der Begriff „Aktivitätsdaten“ geht darauf zurück, dass die IPCC Richtlinien zur nationalen THG-Berichterstattung auf die Erfassung der durch anthropogene Aktivitäten verursachten THG-Emissionen abzielen. Im Landnutzungssektor zählen dazu die auf der Landfläche stattfindenden Aktivitäten wie die Aufforstung, Wiederaufforstung und Entwaldung, Waldbewirtschaftung, Acker- bzw. Grünland-Bewirtschaftung sowie Entwässerung und Wiedervernässung von Feuchtgebieten. Diese Landnutzungsaktivitäten finden auf Flächen mit unterschiedlichen emissionsrelevanten biotischen und abiotischen Eigenschaften („Standortfaktoren“) wie Klima, Wasserstand, Nährstoffgehalt und Vegetation statt. Sie werden als differenzierende Eigenschaften unter dem Begriff „Aktivitätsdaten“ mitberücksichtigt und erhöhen die Genauigkeit der Abschätzung von THG-Emissionen.

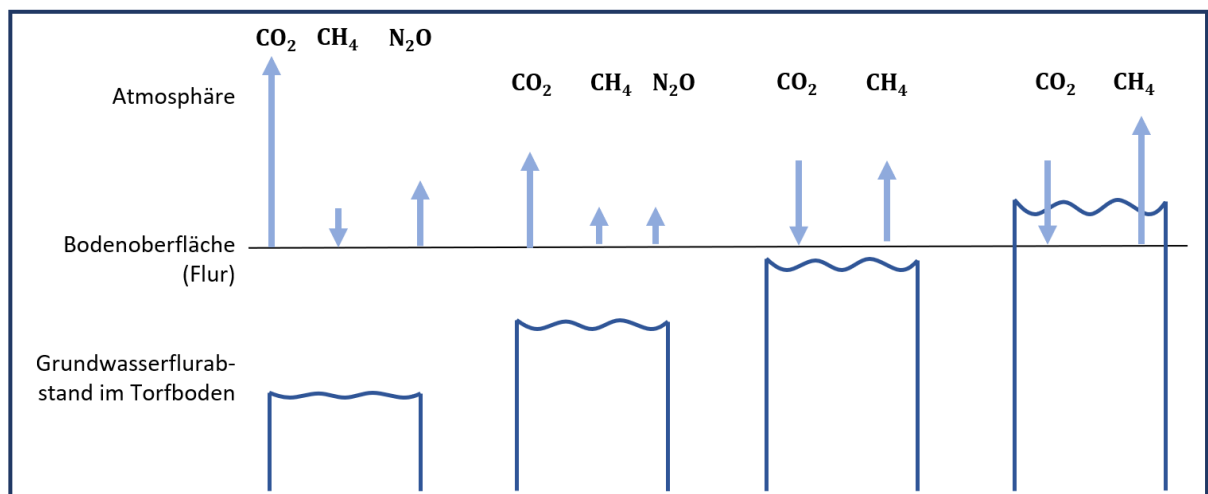
Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Einflüsse einzelner Landnutzungsformen und Standortfaktoren auf die in Kapitel 2.2.1 erläuterten Prozesse und die daraus resultierenden Netto-THG-Emissionen. Tabelle 1 am Ende des Kapitels fasst die Effekte zusammen. **Der Begriff Netto-THG-Emission beinhaltet die Summe von Treibhausgasflüssen über einen bestimmten Zeitraum (in der Regel ein Jahr).** So nehmen Pflanzen nicht nur CO₂ aus der Atmosphäre auf (mit der Photosynthese), sondern stoßen auch CO₂ aus, weil sie zur Unterhaltung ihrer Lebensprozesse „atmen“ müssen. Tagsüber überwiegt zumeist die CO₂-

Aufnahme, während nachts – bei Abwesenheit von Licht für die Photosynthese – der CO₂-Ausstoß überwiegt.

- Der **Wasserstand** hat den stärksten Einfluss auf die THG-Emissionen der Moore, weil er die Verfügbarkeit von Sauerstoff beeinflusst (Evans et al., 2021; Wilson et al., 2016). Bezüglich der Verfügbarkeit von Sauerstoff werden zwei Zonen unterschieden. Im **wassergesättigten Teil des Bodens** ist der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt (phreatische Zone) und enthält keinen für Mikroorganismen verfügbaren Sauerstoff. Es herrschen anoxische Bedingungen vor. Über einer wassergesättigten Bodenschicht befindet sich zumeist eine Schicht, in der der Porenraum ganz oder teilweise **mit Luft gefüllt** ist (vadose Zone). Hier herrschen oxische Bedingungen vor. Der Abstand zwischen dem wassergesättigten Bereich des Bodens und der Bodenoberfläche (Flur) wird als **Grundwasserflurabstand** bezeichnet. Dieser wird üblicherweise als Indikator für den Umfang der Sauerstoffverfügbarkeit in einem Moorboden verwendet und entweder als Jahresdurchschnitt, -median oder in Form von Wasserstufen angegeben. Wasserstufen werden durch einen Wasserstandsbereich im Sommer- und einen Wasserstandsbereich im Winterhalbjahr definiert (Koska, 2001).

Während es unter oxischen Bedingungen in erster Linie zur Emission von CO₂ und N₂O kommt (Evans et al., 2021; Leppelt et al., 2014), wird unter anoxischen Bedingungen auch CH₄ freigesetzt (Turetsky et al., 2014). Bei einem Grundwasserflurabstand von 30 cm und mehr unter Flur treten nahezu keine CH₄-Emissionen auf (Evans et al., 2021). Der Grund dafür ist, dass das in anoxischen Schichten freigesetzte CH₄ im darüber liegenden oxischen Bereich des Bodens zu CO₂ oxidiert wird (Siehe Abbildung 2, Couwenberg & Fritz, 2012a).

Abbildung 2: Abhängigkeit der Netto-THG-Emissionen vom Grundwasserflurabstand



Anmerkung: Blaue Kästen stehen für die wassergesättigte Zone des Bodens. Länge der Pfeile symbolisiert Größenordnung der Netto-Emissionen bzw. -Einbindungen des jeweiligen Treibhausgases.

Quelle: Eigene Darstellung.

In der Literatur besteht Konsens darüber, dass eine Anhebung des Grundwasserflurabstandes bis hin zur Bodenoberfläche zu einer Verringerung der in CO₂eq umgerechneten Gesamtemissionen führt (Evans et al., 2021; Tiemeyer et al., 2020; Wilson et al., 2016). Denn die Abnahme der Netto-CO₂- und N₂O-Emissionen überkompensiert den Anstieg der CH₄-Emissionen zumindest mittel- und langfristig (Günther et al., 2020). Uneinigkeit besteht über die Entwicklung der Netto-CO₂-Emissionen bei Veränderungen im Bereich besonders großer Grundwasserflurabstände. Drösler et al. (2013) gehen davon aus, dass die Netto-CO₂-Emissionen ab Grundwasserflurabständen von mehr als 60 bis 80 cm

nicht weiter ansteigen. Tiemeyer et al. (2020) modellieren diesen nachlassenden Anstieg bereits ab etwa 40 cm. Im Gegensatz dazu projizieren Evans et al. (2021) eine lineare Zunahme der Netto-CO₂-Emissionen über den gesamten untersuchten Grundwasserflurabstandsbereich (bis 100 cm). Ein nachlassender Anstieg der THG-Emissionen kann dadurch begründet sein, dass auch an oxische Bedingungen angepasste Mikroorganismen Wasser benötigen. Bei zu großen Grundwasserflurabständen ist es möglich, dass der Aufstieg von Grundwasser in den Sommermonaten zu gering ist, um eine ausreichende Wasserversorgung der Mikroorganismen in den obersten Bodenbereichen sicherzustellen (Höper, 2007).

All diese Modelle haben ihre wissenschaftliche und pragmatische Berechtigung. Die Unterschiede sind weitgehend darauf zurückzuführen, dass die Datengrundlage an THG-Messungen aus Mooren noch beschränkt ist. Diese Situation wird sich erwartungsgemäß rasch verbessern. Solange eine Vielfalt an Modellen besteht, ist in der Praxis eine bewusste und transparent kommunizierte Entscheidung für ein Modell erforderlich.

- ▶ Auch die **Torfmächtigkeit** beeinflusst die Treibhausgasemissionen. Sie bestimmt in Kombination mit der Lagerungsdichte und dem Kohlenstoffgehalt die in Moorböden gespeicherte Kohlenstoffmenge (Roßkopf et al., 2015). Im Fall von entwässerten Moorböden kann über die Torfmächtigkeit die Restzeit bis zum vollständigen Abbau der organischen Substanz eines Moorkörpers (**Torferschöpfungszeit**) ermittelt werden. In der temperaten Klimazone verringert sich die Mächtigkeit des Torfhorizontes jährlich um ca. 0,4 cm je 10 cm Entwässerungstiefe (Couwenberg et al., 2010, 2011). Evans et al. (2021) berücksichtigen die Torfmächtigkeit ergänzend zum Grundwasserflurabstand, da dieser unter Umständen unterhalb des Torfhorizontes liegt. In einem solchen Fall wird die Höhe der THG-Emissionen nicht vom Grundwasserflurabstand, sondern von der Mächtigkeit des gänzlich entwässerten Torfhorizontes bestimmt. Evans et al. (2021) bezeichnen den jeweils kleineren Wert als „effektiven Moorwasserstand“. In diesem Zusammenhang sind auch mineralische Auflagen über dem Torfhorizont zu berücksichtigen (Wittnebel et al., 2023).
- ▶ Studien zum Einfluss der im Moorboden befindlichen **Nährstoffe** auf die THG-Emissionen, weisen in erster Linie signifikante Zusammenhänge zwischen den THG-Emissionen und dem **Stickstoffgehalt** aus. Ein positiver Zusammenhang besteht zwischen dem Stickstoffgehalt bzw. einem engen C/N Verhältnis und den N₂O- (Leppelt et al., 2014; Tiemeyer et al., 2016) sowie den CO₂-Emissionen (Nielsen et al., 2023; Tiemeyer et al., 2016). Zwischen den CH₄-Emissionen und dem Stickstoffgehalt identifizieren Tiemeyer et al. (2016) sowie Wilson et al. (2016) ebenfalls einen positiven Zusammenhang. Im Gegensatz dazu weisen Nielsen et al. (2023) unter nassen Bedingungen einen negativen Zusammenhang zwischen CH₄-Emissionen und Stickstoffgehalt aus. Einen Zusammenhang anderer Nährstoffe mit den THG-Emissionen identifizieren bei den betrachteten Studien lediglich Nielsen et al. (2023).
- ▶ Der **pH-Wert** des Bodens wird in der Literatur vor allem als wichtige Einflussgröße auf die N₂O-Emissionen benannt (Leppelt et al., 2014). Demnach ist der pH-Wert negativ mit der Höhe der N₂O-Emissionen korreliert – je niedriger der pH-Wert (saurer der Boden), desto höher die N₂O-Emissionen (Leppelt et al., 2014; Nielsen et al., 2023). Tiemeyer et al. (2016) und Wilson et al. (2016) stellen keinen expliziten Zusammenhang zwischen dem pH-Wert und der Höhe der THG-Emissionen her. Letztere heben allerdings die Rolle des Redoxpotentials als wichtigen Einflussfaktor auf die N₂O-Emissionen hervor. Dieses ist umso höher, je niedriger der pH-Wert ist. Couwenberg & Fritz, 2012a) verweisen auf uneinheitliche Ergebnisse bzgl. des Zusammenhanges zwischen CH₄-Emissionen und pH-Wert.

- ▶ Moore werden oft in zwei **Moortypen** eingeteilt, die sich anhand der Herkunft des speisenden Wassers unterscheiden. **Hochmoore** werden ausschließlich von Regenwasser gespeist. Da dieses nährstoffarm und leicht sauer ist, weisen sie natürlicherweise niedrige pH-Werte und geringe Nährstoffgehalte auf. **Niedermoore** werden auch mit Wasser gespeist, welches bereits mit dem Mineralboden in Kontakt gewesen ist. Dieses Wasser ist oft nährstoffreicher und basischer, was höhere Nährstoffgehalte und pH-Werte im Moor begründet. Den höheren Nährstoffgehalt sehen Tiemeyer et al. (2016) als Grund dafür, dass sie bei gleichen Grundwasserflurabständen höhere THG-Emissionen aus Niedermooren als aus Hochmooren beobachten. Auch Drösler et al. (2013) geben für alle untersuchten Landnutzungskategorien höhere THG-Emissionen aus Niedermooren an. Einen signifikanten Unterschied stellen sie allerdings nur bei oberflächennahen Wasserständen bis 20 cm unter Flur fest.
- ▶ Die klimatischen Parameter **Niederschlag, Temperatur und Belichtungsintensität** beeinflussen die THG-Emissionen der Moore ebenfalls. Niederschläge wirken sich auf den Grundwasserflurabstand und die Bodenfeuchte aus. Der Einfluss der Temperatur und der Belichtungsintensität wird auf regionaler Ebene durch die jahreszeitlichen Schwankungen der Kohlenstoffbindung durch Pflanzenwachstum sowie der Emission von THG durch mikrobielle Aktivität belegt (Aslan-Sungur et al., 2016). Die Intensität beider Prozesse ist in der Vegetationsperiode deutlich stärker ausgeprägt als in den kälteren Wintermonaten (Höper, 2007). Auch das Klima beeinflusst die THG-Emissionen aus Mooren: die Emissionen ähnlicher Moore steigen von der borealen über die gemäßigte bis zur tropischen Klimazone an.
- ▶ Die **Vegetation** ist nicht nur durch die Produktion von Biomasse (Kapitel 2.2.1) wichtig für die Kohlenstofffestlegung in nassen Mooren. Sie beeinflusst auch die mikrobielle Aktivität im Boden. Junge, abgestorbene Pflanzenteile stellen leicht zersetzbare Biomasse dar. Diese ist die Hauptursache für hohe CH₄-Emissionen im Fall eines Wasserüberstaus bzw. oberflächennaher Wasserstände (Couwenberg & Fritz, 2012). Außerdem fördert die Ausscheidung von energiereichen Wurzelexsudaten die mikrobielle Aktivität (Baudoin et al., 2003) und damit die Emission aller THG in nassen und entwässerten Mooren.
- ▶ Im Rahmen der anthropogenen **Nutzung von Mooren** zu land- und forstwirtschaftlichen Zwecken oder als Infrastruktur- bzw. Siedlungsfläche wird aktiv Einfluss auf die Standortbedingungen eines Moores und damit auf die THG-Emissionen genommen. Die anthropogene Einflussnahme reicht von der Entwässerung über die Etablierung mooruntypischer (Nutz-)Pflanzenarten bis zur Veränderung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften. Mechanische Eingriffe in das Bodengefüge erhöhen beispielsweise kurzfristig die Sauerstoffverfügbarkeit, die mikrobielle Aktivität und somit auch die THG-Emissionen (Freibauer et al., 2004). Eine im Rahmen von Düngung stattfindende Nährstoffzufuhr verändert die chemischen Eigenschaften des Bodens. Ob sie einen steigernden Effekt auf die mikrobielle Aktivität hat, hängt allerdings unter anderem davon ab, wie hoch der Nährstoffgehalt im Boden vor der Düngung war. Einen grundsätzlichen positiven Zusammenhang zwischen der Düngung und den THG-Emissionen können Tiemeyer et al. (2016) daher nicht ableiten.

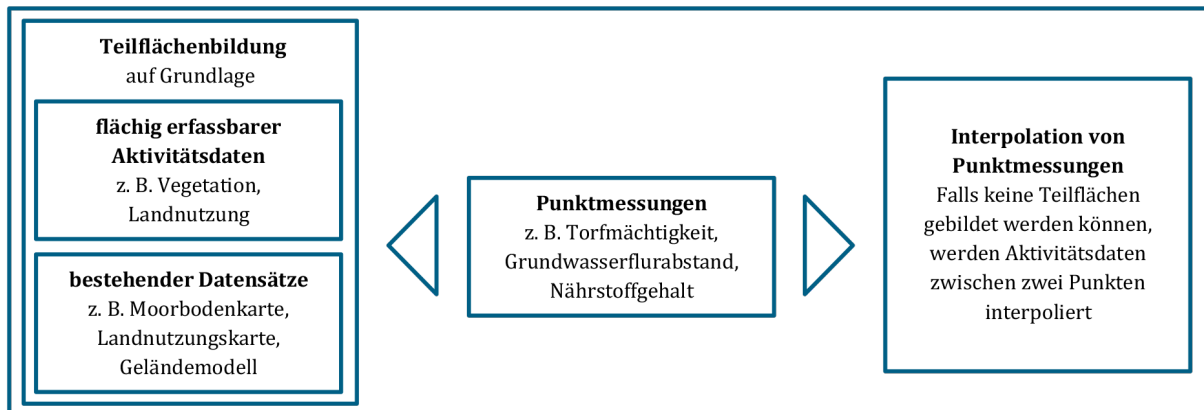
Vegetation und Landnutzung beeinflussen die THG-Emissionen nicht nur durch die Stimulierung mikrobieller Prozesse oder den Abtransport von Methan, sie können auch als Indikator für andere Standortbedingungen (Couwenberg et al., 2008; Ellenberg et al., 2010) und direkt für THG-Emissionen dienen (Couwenberg et al., 2011; IPCC, 2014; siehe unten).

Tabelle 1: Überblick: Einfluss von Aktivitätsdaten auf die THG-Emissionen aus Mooren

Aktivitätsdaten	Einfluss auf die THG-Emissionen	Messbarkeit
Grundwasserflurabstand	Je niedriger der Abstand zwischen Bodenoberfläche und wassergesättigter Zone des Bodens, desto geringer die THG-Emissionen.	Punktuell: Pegelmessung Flächig: Interpolation anhand von Geländemodellen oder Vegetation
Torfmächtigkeit	Je mächtiger der Torfhorizont, desto mehr organisch gebundener Kohlenstoff kann sowohl pro Zeiteinheit als auch insgesamt freigesetzt werden.	Punktuell: Bodenprofil, Bohrung Flächig: Interpolation oder Verfahren der Geophysik
Stickstoffgehalt	Je höher der Stickstoffgehalt und damit, je enger das C/N-Verhältnis, desto höher die THG-Emissionen.	Punktuell: Entnahme von Bodenproben und Laboranalyse Flächig: Interpolation anhand von Vegetation
pH-Wert	Je niedriger der pH-Wert, desto höher die N ₂ O-Emissionen	Punktuell: Entnahme von Bodenproben, Analyse im Feld möglich Flächig: Interpolation anhand von Vegetation
Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> - Abgestorbene Biomasse erhöht die CH₄-Emissionen in Überstausituationen - Das Vorkommen von Shunt Species erhöht die CH₄ Emissionen - Wurzelexsudate erhöhen die mikrobielle Aktivität und dadurch die THG-Emissionen - Vegetation ist Indikator für andere Standortbedingung mit Einfluss auf die THG-Emissionen 	Flächig: Vegetationskartierung im Gelände oder auf der Basis von Fernerkundung
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> - Art der Landnutzung wirkt sich auf Entwässerungstiefe aus - Bodenbearbeitung erhöht Sauerstoffgehalt im Boden - Düngung erhöht verfügbare Nährstoffe 	Flächig: Vor-Ort-Erfassung, Agrarstatistik, Fernerkundung

2.2.3 Erfassung von Aktivitätsdaten

Die flächendeckende Abschätzung der THG-Emissionen eines Gebietes erfordert flächenhafte Informationen über die emissionswirksamen Aktivitätsdaten (Standorteigenschaften und Landnutzungsaktivitäten). Während bei kleineren Gebieten Daten vor Ort erhoben werden können, müssen überregionale Ansätze in der Regel auf bereits verfügbare Datensätze zurückgreifen. Im Folgenden wird sowohl ein Überblick über bereits verfügbare Datensätze gegeben als auch auf Möglichkeiten der Datenerhebung eingegangen (Abbildung 3).

Abbildung 3: Flächige Erfassung von Aktivitätsdaten

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Rahmen von **Vor-Ort-Untersuchungen** können abiotische Standortbedingungen wie der Grundwasserflurabstand oder der Nährstoffgehalt im Boden unmittelbar gemessen werden.

- ▶ Die Messung der **Grundwasserflurabstände**, die günstigstenfalls über mindestens ein ganzes Jahr aufgenommen werden müssen, erfolgt mit senkrecht in die Erde eingelassenen, perforierten Rohren („**Pegelrohr**“ / „**dip-well**“), in welchen idealerweise automatische Pegelmesser integriert sind. Kostengünstiger, aber deutlich ungenauer, sind Verfahren mit einer geringeren zeitlichen Resolution, wie z. B. die Verwendung von Eisenstangen, welche in Höhe des Wasserstandes zu rosten beginnen (Lindsay et al., 2019).
- ▶ Die **Torfmächtigkeit** kann händisch durch das Ausheben von **Bodenprofilen** oder unter Einsatz verschiedenartiger Bohrgeräte ermittelt werden (De Vleeschouwer et al., 2010). Falls größere Gebiete zu kartieren sind, müssen zahlreiche Messungen durchgeführt werden, was kosten- und eingriffsintensiv ist (Meier et al., 2002).
- ▶ Die **Nährstoff- und Kohlenstoffgehalte** eines Bodens werden in **Laboranalysen** ermittelt. Bei einer solchen Untersuchung kann auf die Bodenprobe eines Punktes oder auf mehrere Proben, welche z. B. entlang eines Transektes entnommen wurden, zurückgegriffen werden. Da die Proben zur Ermittlung chemischer Bodeneigenschaften homogenisiert und getrocknet werden, ist eine stauchfreie Probenentnahme, wie sie bei der Bestimmung physikalischer Eigenschaften (z. B. Trockenrohddichte oder Kohlenstoffdichte) notwendig ist, nicht relevant (Tiemeyer et al., 2017).
- ▶ Auch der **pH-Wert** zählt zu den chemischen Eigenschaften eines Bodens. Dieser kann näherungsweise mittels **Indikatorpapiers** oder **pH-Sonden** direkt im Feld bestimmt werden. Eine größere Genauigkeit liefern Laboranalysen (Tiemeyer et al., 2017).

Zur Abschätzung der THG-Emissionen ist eine flächendeckende Betrachtung des Mooregebietes erforderlich. Diese ist mit den genannten Methoden nicht möglich, da sie lediglich punktuelle Informationen liefern. Zur **Übertragung in die Fläche** muss folglich auf flächig erfassbare Parameter zurückgegriffen werden.

- ▶ Ein stark integrativer Parameter ist die **Vegetation**. Mittels Vegetationskartierungen lassen sich Moorflächen in homogene Teilflächen mit einem einheitlichen Vorkommen von Pflanzenarten unterteilen. Die identifizierten Arten lassen Rückschlüsse auf die über einen längeren Zeitraum vorherrschenden Standortbedingungen zu. Zur Identifizierung der Standortbedingungen auf Grundlage einzelner Pflanzenarten haben Ellenberg et al. (2010)

für die Pflanzen Mitteleuropas sogenannte „**Zeigerwerte**“ definiert. Diese weisen für verschiedene Standortfaktoren Ausprägungsbereiche aus, die beim Vorkommen der jeweiligen Pflanzenart wahrscheinlich gegeben sind. Eine noch höhere Genauigkeit bei der Bestimmung von Standortfaktoren auf Grundlage von Vegetation kann durch die gleichzeitige Betrachtung aller vorkommenden Arten oder Artengruppen erzielt werden (Koska et al., 2001). Die kombinierte Betrachtung der Arten erlaubt eine schärfere Identifikation der Standortbedingungen, nicht nur wegen der sich nur teilweise überschneidenden Standortansprüche, sondern auch weil die Konkurrenz zwischen den Arten die Standortbedingungen bei denen einzelne Arten vorkommen („ökologische Amplitude“) weiter verringert (Kotowski & van Diggelen, 1998). Der Rückgriff auf die Indikatorfunktion von Vegetation ist vor allem in Gebieten mit spontan vorkommenden Pflanzenarten möglich. Intensive Landnutzung führt zu einer starken Verarmung dieser Arten und erschwert die Identifizierung unterschiedlicher Standortbedingungen auf Grundlage von Vegetation (Tiemeyer et al., 2017).

Unter Rückgriff auf Koska et al. (2001) haben Couwenberg et al. (2008, 2011) einen Ansatz entwickelt, welcher es ermöglicht, die THG-Emissionen eines Moores auf Grundlage der vorherrschenden Vegetation einzuschätzen. Das Ergebnis sind sogenannte „GESTs“ (Greenhouse Gas Emission Site Types). Jeder GEST weist die THG-Emissionen einer potentiell in norddeutschen Mooren vorkommenden Pflanzengesellschaft („Vegetationsform“) aus.

Mit den GESTs vergleichbar sind die auf Landesebene definierten Biotoptypen (z. B. LfU Bayern, o. J.; LfU Brandenburg, o. J.). Diese können zur Charakterisierung aller Naturräume eines Bundeslandes eingesetzt werden. Sie sind allgemeiner als die speziell für Moore definierten GESTs von Couwenberg et al. (2008). Im Kontext von Moorstandorten können Biotoptypen dennoch relativ spezifische Ausprägungen von Standortfaktoren (Goebel, 1996; Rasper, 2004) und GESTs zugeordnet werden (Reichelt, 2021).

- ▶ Eine Möglichkeit zur flächigen Abschätzung der **Grundwasserflurabstände** auch in intensiv genutzten Moorgebieten stellen hochaufgelöste digitale Geländemodelle dar, womit einzelne Messungen zumindest bei kleinräumiger Betrachtung in die Fläche übertragen werden können. Solche digitalen Geländemodelle werden mittels „LIDAR-Überfliegung“ erstellt und sind bereits für viele Regionen verfügbar und bei den zuständigen Landesämtern abrufbar (Tiemeyer et al., 2017).
- ▶ Die **Torfmächtigkeit** kann mit geophysikalischen Verfahren z. B. mit Georadar (Meier et al., 2002) oder Geoelektrik (Becker, 2022) flächig erfasst werden. Während diese Verfahren noch immer im Feld angewandt werden müssen, kann die Torfmächtigkeit mit Verfahren der Geomagnetik auch durch Überfliegung ermittelt werden (Siemon et al., 2020). Solche Fernerkundungsverfahren sehen vielversprechend aus, befinden sich aber noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung.

Können Standortparameter nicht flächig erfasst werden, sind die Punktmessdaten durch Interpolation auf die gesamte Fläche zu übertragen.

Sowohl die punktuelle als auch die flächige Ermittlung von Standortfaktoren basiert auf kosten- bzw. personalintensiven Verfahren. Ihnen werden daher **bestehende Datensätze** vorgezogen, sofern dies ohne Abstriche bei der gewünschten Genauigkeit möglich ist. Für überregionale Analysen liegen Daten zur Ausdehnung von Mooren, deren Torfmächtigkeit und Typ, sowie dem Biotop- und Landnutzungstyp auf nationaler Ebene vor. Aufgrund des zentralen Einflusses des Grundwasserflurabstandes auf die THG-Emissionen aus Mooren wurde ein Modell für dessen

überregionale Abschätzung entwickelt. Nationale Übersichtskarten, welche die Nährstoffgehalte im Boden ausweisen, gibt es nicht.

- ▶ Kartierungen, die die **räumliche Ausdehnung** von Mooren betreffen, wurden in den vergangenen Jahren sowohl in Deutschland (Roßkopf et al., 2015) als auch in Europa (Tanneberger et al., 2017) gebündelt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit optimiert (Tegetmeyer et al., 2021; Wittnebel et al., 2023). Die „aktualisierte Kulisse organischer Böden“ von Wittnebel et al., 2023a) illustriert nicht nur die Ausdehnung von Mooren sowie An- und Abmooren in Deutschland. Sie weist darüber hinaus auch den Moortyp (Niedermoor-, Hochmoor-, Tiefumbruch-, Moorfolgeboden) und dessen Torfmächtigkeit sowie die Mächtigkeit einer ggf. vorliegenden mineralischen Überdeckung aus. Die räumliche Auflösung der Karte variiert in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Moorkarten der einzelnen Bundesländer (1:25.000 bis 1:100.000). Genauere Umrisse und die Berücksichtigung von Kleinstmooren erfordern weitergehende, standortspezifische Untersuchungen.
- ▶ Bei der **Torfmächtigkeit** beschränkt sich die von Wittnebel et al., 2023a) erstellte Karte auf die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung ausgewiesenen fünf Mächtigkeitsstufen. Da die Mächtigkeitsstufen Intervallgrößen zwischen 20 und 80 cm umfassen, können sie lediglich einen ersten Anhaltspunkt für die Ermittlung von effektiven Moorwasserständen bzw. Torferschöpfungszeiten darstellen. Darüber hinaus ist die Ermittlung letzterer ebenso wie die Quantifizierung der insgesamt gespeicherten Kohlenstoffmenge durch die fehlende Differenzierung von Torfmächtigkeiten über 2 m stark eingeschränkt (aber für die Periode bis 2045 auch weniger relevant).
- ▶ Zur Bestimmung der **Grundwasserflurabstände** auf nationaler Ebene gibt es nicht genügend Messstellen, um diese allein unter Zuhilfenahme topographischer Karten flächendeckend abzuschätzen. Daher haben Bechtold et al. (2014) eine Methode zur statistischen Modellierung von Grundwasserflurabständen entwickelt. Diese basiert auf neun aus nationalen Datenbanken auslesbaren Parametern. Einen besonders starken Zusammenhang stellten Bechtold et al. (2014) zwischen dem Grundwasserflurabstand und der Landnutzungskategorie (z. B. Ackerland), sowie dem Moortyp (z. B. Hochmoor) fest. Die Modellierung der Grundwasserflurabstände erfolgt in einem 25*25 m Raster. Das Modell erklärt etwa 45 % der für die Abschätzung von THG-Emissionen relevanten Wasserstandsvarianz. Dieser relativ geringe Wert wird vor allem mit den in nationalen Datenbanken nur begrenzt verfügbaren Parametern begründet.
- ▶ Informationen hinsichtlich der **Landnutzung** werden **deutschlandweit** im „Digitalen Basis-Landschaftsmodell“ (ATKIS Basis DLM) ausgewiesen. Hierbei handelt es sich um einen hochaufgelösten, mindestens jährlich aktualisierten Vektordatensatz im Maßstab 1:10.000 bis 1:25.000. Im Bereich der Vegetation werden relativ allgemeine Landnutzungskategorien unterschieden. Landwirtschaftlich genutzte Flächen werden in Ackerland, Grünland, Brachland sowie verschiedenen Sonderkulturformen eingeteilt, Wälder in Laub-, Misch- und Nadelwald. Außerdem werden Gehölze, Heiden, naturnahe Moore und Sümpfe in eigenen Landnutzungskategorien ausgewiesen (AdV, 2018b). Genauere Informationen zur land- und forstwirtschaftlichen Bodennutzung (angebaute Kulturarten, dominierende Baumart) werden vom Thünen-Institut basierend auf Fernerkundungsdaten der Erdbeobachtungsmissionen Sentinel-1, Sentinel-2 und Landsat-8/9 bereitgestellt (Thünen Earth Observation, 2023).

Auch auf **internationaler Ebene** liegen Datensätze vor, die die Landnutzung in einer hohen räumlichen Auflösung abbilden. Auf globaler Ebene gibt es einen Datensatz, welcher die Erde in 11 Landnutzungskategorien (z. B. Bäume, Sträucher, Ackerland, Grünland) einteilt und diese in einem 10*10 m Raster abbildet (FAO, 2022). Auf europäischer Ebene weisen die „CORINE Land Cover Map“ und ihre Erweiterung, die „LUISA Base Map“ die Landnutzung in einer höheren Differenzierung von 46 Kategorien, aber geringeren räumlichen Auflösung in einem 50*50 m Raster aus (Pigaiani & Batista e Silva, 2021).

- ▶ Die Vegetation extensiv bzw. **nicht genutzter Moore** wird von den auf Fernerkundung basierenden Landnutzungs-Datensätzen wenig detailliert abgebildet. Als Ergänzung können Vegetationskartierungen der Fauna-Flora-Habitat- (FFH-) Gebiete und anderer naturschutzfachlich relevanter Gebiete herangezogen werden. Für diese Gebiete liegen detaillierte Kartierungen der oben erwähnten Biotoptypen vor (z. B. LfU Bayern, o. J.; LfU Brandenburg, o. J.). Da die Merkmale und Bezeichnungen eines Biotoptyps von jedem Bundesland individuell festgelegt werden, sind nationale Analysen nicht ohne eine vorhergehende Harmonisierung der Biotoptypen möglich. Eine solche Synthese stellt der vom Bundesamt für Naturschutz (BfN, o. J.) zur Verfügung gestellte Übersetzungsschlüssel zur Einordnung der regionalen Biotoptypen in die in der Bundeskompensationsverordnung (BKompV) auf nationaler Ebene festgelegten Biotoptypen dar (BfN & BMU, 2021). Die Vegetationsformen nach Couwenberg et al. (2008) (GESTs) werden nicht standardmäßig kartiert, eine näherungsweise Zuordnung von Biotopkartierungen ist allerdings möglich (Reichelt, 2021).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Vegetation zur Abschätzung der THG-Emissionen eines Moores eine besondere Rolle zukommt. Wegen der Armut an spontanwachsenden Pflanzenarten bei intensiver Landnutzung, genügt – zur Abschätzung der THG-Emissionen – die alleinige Betrachtung der Vegetation allerdings nur bei weniger intensiv genutzten Mooren. Ergänzend heranziehbar überregionale Datensätze sind oftmals zu anderen Zwecken erstellt worden, als zur Abschätzung der THG-Emissionen von Mooren. Sie sind daher zumeist nicht ohne zusätzliche Messungen oder modellbasierte Schätzungen nutzbar.

2.3 Abschätzung von Treibhausgasemissionen

Zur Abschätzung der THG-Emissionen eines Moores wird das zu untersuchende Gebiet in homogene Teilflächen unterteilt. Zunächst werden die durchschnittlichen THG-Emissionen pro Flächeneinheit und Jahr der einzelnen Teilflächen bestimmt. Dies kann durch die auf Aktivitätsdaten basierende Einordnung der Teilfläche in eine Emissionsklasse erfolgen (Kapitel 2.3.1). Alternativ können die Emissionen individuell berechnet werden, indem bestimmte Aktivitätsdaten in ein statistisches bzw. prozessbasiertes Modell eingesetzt werden (Kapitel 2.3.2). In beiden Fällen werden die THG-Emissionen pro Flächeneinheit und Jahr abschließend mit der Größe der Teilfläche multipliziert. Die Summe aller Teilflächen ergibt die THG-Emissionen eines Moores.

2.3.1 Bildung von Emissionsklassen und Emissionsfaktoren

Die Prozesse der THG-Emission und -Einbindung eines Moores werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass die Höhe der THG-Emissionen an jedem Standort anders ist. Um dies für eine großflächige Erfassung der THG-Emissionen handhabbar zu machen, können homogene Teilflächen auf Grundlage vorherrschender Standortbedingungen und Landnutzungsaktivitäten in **Emissionsklassen** eingeordnet werden. Jede Emissionsklasse deckt einen bestimmten Ausprägungsbereich von Standorteigenschaften und Landnutzungsaktivitäten

ab. Außerdem ist für jede Emissionsklasse die durchschnittliche Höhe der Netto-CO₂, CH₄ und N₂O-Emissionen pro Hektar und Jahr definiert. Die Bildung von Emissionsklassen erfolgt in einem iterativen Prozess aus THG-Emissionsmessungen und der daran orientierten Klassifizierung relevanter Standorteigenschaften und Landnutzungsaktivitäten.

Die durchschnittliche Netto-Emissionsmenge pro Hektar und Jahr jedes einzelnen Treibhausgases wird auch als **Emissionsfaktor** bezeichnet. Emissionsfaktoren sind mit Unsicherheiten behaftet, da von einzelnen Messungen auf alle Standorte geschlossen wird, die den Merkmalen einer Emissionsklasse entsprechen (IPCC, 2006, Vol. 1, Kapitel 3). Die Unsicherheit wird in Form von Konfidenzintervallen quantifiziert. Dabei handelt es sich um Bereiche, in denen die tatsächliche Netto-THG-Emissionsmenge eines Standortes mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt.

Wird das **Konfidenzintervall** einer Emissionsklasse für zu groß befunden, kann eine feinere Einteilung der Emissionsklassen vorgenommen werden, indem entweder die Ausprägungen der inkludierten Standortparameter stärker abgestuft oder weitere Parameter als erklärende Variablen hinzugefügt werden. Die Ausdifferenzierung einzelner Emissionsklassen ist dadurch begrenzt, dass die inkludierten Parameter im gesamten Untersuchungsgebiet mit der Methodik des jeweiligen THG-Erfassungsansatzes kosteneffizient identifizierbar sein müssen. Zur Bestimmung der Gesamtemissionen einer Emissionsklasse werden die Emissionen der unterschiedlichen Treibhausgase in eine gemeinsame Einheit umgerechnet und zusammengezählt. Als „Währung“ wird standardmäßig das „**Treibhauspotential**“ (Global Warming Potential, GWP) verwendet. Das Treibhauspotential gibt an, wie viel Mal stärker ein Nicht-CO₂-THG-Molekül auf die Erderwärmung wirkt als ein CO₂-Molekül und drückt diesen Wert in CO₂-Äquivalenten (CO₂eq) aus (Myhre et al., 2013). Weil jedes Gas eine unterschiedliche mittlere Lebensdauer in der Atmosphäre hat (z. B. CH₄ etwa 12 Jahre, CO₂ einige Jahrhunderte und ein Teil bleibt „praktisch ewig“, Inman, 2008), variiert das Treibhauspotential abhängig vom betrachteten Zeitraum. Es werden standardmäßig die ersten 100 Jahre nach Ausstoß des THG betrachtet (GWP₁₀₀). Die Treibhauspotentiale werden in regelmäßigen Abständen auf Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse aktualisiert. Gegenwärtig werden zumeist die GWP₁₀₀-Werte des 5. Assessment Reports des IPCC verwendet (CH₄ = 28, N₂O = 265, Myhre et al., 2013).

Die Festlegung des Betrachtungszeitraumes ist das Resultat eines politischen Aushandlungsprozesses. Ein anderer Betrachtungszeitraum führt zu einer anderen Einschätzung der Bedeutung einzelner THG für die Erderwärmung. Kurze Betrachtungszeiträume führen zu einer geringeren Gewichtung von CO₂ gegenüber kurzlebigeren Treibhausgasen, bei längeren Betrachtungszeiträumen werden die kurzlebigen THG weniger stark gewichtet. Die von entwässerten Mooren emittierten Treibhausgase CO₂ und N₂O haben eine lange atmosphärische Verweildauer. Das von nassen Mooren emittierte CH₄ hat eine kurze Verweildauer. Folglich führt der – im Verhältnis zur jahrhundertelangen Verweildauer des CO₂ – kurze Betrachtungszeitraum (GWP₁₀₀) dazu, dass beim Vergleich unterschiedlicher Managementoptionen die langfristige Emissionsreduktion durch Wiedervernässung unterschätzt wird (Günther et al. 2020).

2.3.2 Die Tier Ansätze zur Darstellung der methodischen Genauigkeit

Das IPCC unterscheidet für die Abschätzung von THG-Emissionen im Rahmen der nationalen THG-Berichterstattung drei Grade der methodischen Genauigkeit (tier-Ansätze) (IPCC, 2006, Vol. 1, Kap. 1). Hinsichtlich der Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren liegen die wesentlichen Unterschiede in den Anforderungen an die Erfassung von Aktivitätsdaten und die darauf aufbauende Abschätzung der THG-Emissionen (IPCC, 2006, Vol. 4, Kap. 2). Während es sich bei den Tier 1 und Tier 2 Ansätzen um statische Ansätze handelt, die auf der Einteilung von

Mooren in Klassen mit einem festgelegten Emissionsfaktor pro Klasse beruhen (Emissionsklassen, siehe oben), handelt es sich bei Tier 3 Ansätzen um statistische oder prozessbasierte Modelle. Vereinfacht gesagt handelt es sich dabei um Gleichungen, in die die Ausprägungen bestimmter Aktivitätsdaten (z. B. Grundwasserflurabstand) eingesetzt werden. Als Ergebnis erhält man einen individuellen Emissionsfaktor (IPCC, 2006, Vol. 4, Kap. 2).

Der **Tier 1 Ansatz** hat die geringste Genauigkeit und führt somit zum Ergebnis mit der größten Unsicherheit. Unter dem Tier 1 Ansatz sind Moore und stattfindende Aktivitäten auf Grundlage weniger Parameter mit groben Abstufungen klassifiziert. Jeder Emissionsklasse wird ein weltweit verwendbarer Standardemissionsfaktor zugeordnet. Jahreszeitliche oder zwischenjährliche Schwankungen in den THG-Emissionen werden bei gleichbleibender Nutzung eines Bodens in diesem Ansatz nicht berücksichtigt (IPCC, 2014).

Beim **Tier 2 Ansatz** werden detailliertere Aktivitätsdaten erhoben und regionale bzw. nationale Emissionsklassen gebildet. Eine genauere Klassifizierung hängt von den verfügbaren Daten bzw. Erhebungsmöglichkeiten ab.

Der **Tier 3 Ansatz** unterscheidet sich grundlegend von den ersten beiden Ansätzen. In diesem Ansatz werden die Moore nicht in Emissionsklassen eingeteilt. Stattdessen werden die THG-Emissionen auf Grundlage eines Prozessverständnisses und umfangreichen Messungen von Standortparametern modelliert. Die graduelle Abbildung der THG-Emissionen ermöglicht die Berücksichtigung auch kleiner Änderungen einzelner Parameter. Witterungsbedingte Schwankungen zwischen einzelnen Jahren können ebenso berücksichtigt werden wie Unterschiede in der Landnutzung. Die Voraussetzung für einen modellbasierten Tier 3 Ansatz ist ein hohes Maß an standortspezifischen Echtzeitinformatoren.

Tier 2 bzw. Tier 3 Ansätze sind in nationalen Treibhausgas Inventarberichten zur Abschätzung der THG-Emissionen von Schlüsselkategorien („key-categories“) zu verwenden (IPCC 2006, Vol. 1, Kap. 4). Die Bestimmung von Schlüsselkategorien orientiert sich an der vom IPCC (2006, Vol. 1, Kap. 4) vorgeschlagenen, feingliedrigen Unterteilung der THG-Quellen und -Senken in abgrenzbare Kategorien. Zur Identifizierung der Schlüsselkategorien werden zunächst alle Kategorien gemäß der Höhe der durch sie verursachten THG-Emissionen in absteigender Reihenfolge geordnet. Im Anschluss wird ausgehend von der Kategorie mit den größten THG-Emissionen ermittelt, welche Kategorien zu 95 % der gesamten THG-Emissionen eines Staates beitragen. Diese Kategorien sind die Schlüsselkategorien. Ergänzend können Trends in der THG-Emissionsentwicklung einzelner Kategorien und die Höhe des Beitrages einzelner Kategorien zur Unsicherheit des Gesamtinventars mitberücksichtigt werden. Im nationalen Inventarbericht der EU zählen die CO₂ Emissionen der Landnutzungskategorien Wald, Acker, Grünland und Feuchtgebiete ebenso zu den Schlüsselkategorien wie die N₂O Emissionen der landwirtschaftlich genutzten Flächen. In Deutschland sind es darüber hinaus die CH₄-Emissionen der Feuchtgebiete.

2.4 Zwischenfazit

Eine belastbare, wissenschaftsbasierte Erfassungsmethode von THG-Emissionen aus Mooren erfordert eine an den THG-Emissionen orientierte Abgrenzung von Moor- und Mineralböden. Außerdem basiert sie zumindest auf einer Auswahl der vorgestellten Aktivitätsdaten. Die Aktivitätsdaten müssen im gesamten Untersuchungsgebiet einheitlich erfasst werden können. Ob dabei auf Vor-Ort-Untersuchungen, Fernerkundung oder bestehende Datensätze zurückgegriffen wird, hängt von der Größe des Untersuchungsgebietes, den technischen Möglichkeiten und den Ansprüchen an die Genauigkeit ab. Dasselbe gilt für die Entscheidung, ob

die THG-Emissionen unter Rückgriff auf Emissionsklassen oder statistische bzw. prozessbasierte Modelle abgeschätzt werden.

Die THG-Emissionen aus Mooren werden durch verschiedene Parameter beeinflusst, darunter der Grundwasserflurabstand, die Torfmächtigkeit, der Stickstoffgehalt, der pH-Wert, die Vegetation, die Landnutzung und klimatische Bedingungen wie Temperatur und Niederschlag. Der Grundwasserflurabstand spielt dabei die zentrale Rolle, da er die Sauerstoffverfügbarkeit im Boden bestimmt, was wiederum die mikrobiellen Prozesse steuert, die zur Freisetzung von CO₂, N₂O und CH₄ führen. Ebenso beeinflusst die Torfmächtigkeit, wie viel Kohlenstoff im Boden gespeichert ist und potenziell freigesetzt werden kann, während der Stickstoffgehalt insbesondere die N₂O-Emissionen beeinflusst.

Diese Parameter können auf verschiedene Weise erfasst werden: Der Grundwasserflurabstand kann mittels Pegelrohren oder automatisierten Pegelmessern gemessen werden. Die Torfmächtigkeit wird durch Bodenproben und Bohrungen bestimmt, der Stickstoffgehalt und pH-Wert durch Laboranalysen von Bodenproben. Vegetationskartierungen im Gelände oder durch Fernerkundung ermöglichen die flächige Erfassung der Vegetation, die als Indikator für andere Standortbedingungen dient. Für großflächige Untersuchungen können fernerkundungsbasierte Methoden wie LIDAR oder geophysikalische Verfahren zur Erfassung der Torfmächtigkeit oder digitaler Geländemodelle herangezogen werden.

Die Quantifizierung von THG-Emissionen ist für kosteneffizienten Klimaschutz und insbesondere für ergebnisbasierte private oder öffentliche Finanzierungsmaßnahmen in der Regel wesentlich. Der Zusammenhang zwischen Grundwasserflurabstand und den THG-Emissionen ist jedoch wissenschaftlich schon eindeutig belegt: Auch ohne exakte Quantifizierung ist wissenschaftlich nachgewiesen, dass die Emissionen aus trockengelegten Moorböden sinken, je höher der Grundwasserpegel unter Flur angehoben wird. Die Wiedervernässung von Mooren ist deshalb auch ohne präzise Quantifizierung ihrer Wirkung immer eine wirksame Klimaschutzmaßnahme und sollte zügig in der Fläche umgesetzt werden. Mangelnde Präzision in der Quantifizierung ist kein grundsätzliches Argument gegen die Umsetzung einer Moorschutzmaßnahme.

3 Vergleichende Analyse von Ansätzen zur Erfassung von Treibhausgasemissionen aus Mooren

Die THG-Emissionen aus Mooren werden in verschiedenen Zusammenhängen erfasst.

1. Im Rahmen der nationalen THG-Berichterstattung erfolgt eine staatliche Erfassung.
2. Private und öffentliche Moorklimaschutzprojekte sind auf die Reduktion von THG-Emissionen ausgerichtet und müssen Emissionen im Zusammenhang dieser Projekte abschätzen und überwachen.
3. Unternehmen bilanzieren ihre THG-Emissionen für die unternehmerische THG-Berichterstattung.

Das nachfolgende Kapitel vergleicht die unterschiedlichen Anwendungsbereiche dieser Ansätze und geht auf die daraus resultierenden Unterschiede in der moorbezogenen THG-Erfassungsmethodik ein. Im Zusammenhang mit der nationalen THG-Berichterstattung wird sowohl auf die internationalen Richtlinien des IPCC (2006, 2014) als auch auf ihre Ausgestaltung in Deutschland eingegangen (UBA, 2024c). Aus der Vielzahl von Standards für Moorklimaschutzprojekte werden die deutschen Regionalstandards „MoorFutures“⁹, „Moorland“¹⁰ und „Moorbenefits 2.0“¹¹, der in Großbritannien verbreitete „Peatland Carbon Code“ (PCC)¹² und die Methodologie VM0036 des weltweit angewandten „Verified Carbon Standard“ (VCS)¹³ exemplarisch betrachtet. Im Bereich der THG-Berichterstattung von Unternehmen wird das GHG Protocol¹⁴ als am weitesten verbreiteter Standard analysiert.

Die Grundlage der Analyse stellen von den jeweiligen Ansätzen veröffentlichte und referenzierte Dokumente dar. Der Projektstandard Moorbenefits 2.0 befand sich zum Zeitpunkt der Analyse im finalen Entwicklungsstadium. Die verfügbaren Informationen waren daher trotz Rücksprache mit den Projektverantwortlichen begrenzt. Folglich konnte der Standard in einzelnen Vergleichskategorien nicht oder nur teilweise berücksichtigt werden.

3.1 Anwendungsbereich

3.1.1 Zweck und Zielgruppe

Im Rahmen der Klimarahmenkonvention hat sich die internationale Staatengemeinschaft 1992 erstmals auf eine Begrenzung des Ausstoßes von THG-Emissionen geeinigt (UBA, 2024b). Im Kyoto Protokoll 1997 wurden darüber hinaus verbindliche Emissionsreduktionsziele für die damals größten Verursacher der Erderwärmung, nämlich 37 Industriestaaten und die EU (Annex I Staaten) festgelegt (United Nations, 1997). Zum Nachweis der Zielerreichung gegenüber der internationalen Staatengemeinschaft haben sich die Annex I Staaten dazu verpflichtet, jährlich einen **nationalen THG-Inventarbericht** zu erstellen (UNFCCC, 2023). Seit 2003 werden darin die national verursachten THG-Emissionen systematisch ausgewiesen. Die Gruppe der Staaten, die zur Anfertigung von nationalen THG-Inventarberichten **verpflichtet** ist, hat sich im Zuge des Übereinkommens von Paris 2015 (ÜvP) auf alle 195 Mitgliedsstaaten des Abkommens erweitert (UNFCCC, o. J.): Das Ziel des ÜvP ist es, die Erderwärmung verglichen mit

⁹ <https://www.moorfutures.de/>

¹⁰ <https://www.moor-land.de/>

¹¹ <https://www.hswt.de/forschung/projekt/1795-moorbenefits-2-0>

¹² <https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/peatland-code-0>

¹³ <https://verra.org/methodologies/vm0036-methodology-for-rewetting-drained-temperate-peatlands-v1-0/>

¹⁴ <https://ghgprotocol.org/>

dem vorindustriellen Niveau auf höchstens 2°C, besser 1,5°C zu begrenzen (Art. 2 (1a) ÜvP (United Nations, 2015)). Aus diesem Grund haben sich alle Staaten, die das ÜvP ratifiziert haben, dazu verpflichtet, nationale THG-Emissionsreduktionsziele aufzustellen. Diese „Nationally Determined Contributions“ (NDCs) müssen alle fünf Jahre erneuert werden (Art. 4 Paris Agreement, United Nations, 2015). Die Erreichung der Ziele wird zweijährig, erstmals zum 31.12.2024 in nationalen Transparenzberichten nachgewiesen (UNFCCC, o. J.). Die nationale Erfassung von THG-Emissionen und die darauf aufbauende Anfertigung von Inventarberichten wird auch als **nationale THG-Berichterstattung** bezeichnet. Sie dient als Grundlage für die Bemessung des Fortschritts hin zur Erreichung der NDCs.

An Unternehmen werden zunehmend staatliche Anforderungen, aber auch Erwartungen ihrer Share- und Stakeholder an die Reduktion von THG-Emissionen und eine transparente Berichterstattung formuliert (Chithambo et al., 2022). Dabei werden nicht nur die direkt von einem Unternehmen verursachten Emissionen betrachtet, sondern auch jene von Geschäftspartnern (Hartmann & Moeller, 2014; Seuring et al., 2022). Das „**Greenhouse Gas Protocol**“ (**GHG Protocol**) stellt einen internationalen und weit verbreiteten Standard zur **freiwilligen Erfassung** von THG-Emissionen auf Unternehmensebene dar (Kasperzak et al., 2023). Unter anderem ist es die methodische Grundlage der „Science Based Targets initiative“ (SBTi) in der sich bereits über 8.000 Unternehmen freiwillig das Ziel der THG-Neutralität gesetzt haben (SBT, 2024).

Auch im Bereich der für große Unternehmen **verpflichtenden Nachhaltigkeitsberichterstattung** unter der Europäischen „Corporate Social Responsibility Directive“ (CSRD) wird das GHG Protocol als zu verwendender Standard für die Erfassung von THG-Emissionen benannt (European Parliament & European Council, 2023a; Directive (EU) 2022/2464, o. J.). Da die CSRD die Berücksichtigung von indirekt verursachten Emissionen (Scope 3, z. B. innerhalb der Wertschöpfungskette) vorschreibt, wirkt sie sich auch auf kleinere Unternehmen aus, welche mit unter die CSRD fallenden Unternehmen wirtschaftlich interagieren.

Neben privatwirtschaftlichen Unternehmen aller Sektoren können auch öffentliche Institutionen und gemeinnützige Organisationen auf die Standards des GHG Protocol zurückgreifen (Pankaj Bhatia et al., 2011; Ranganathan et al., 2004). Außerdem kann über die Berichterstattung gegenwärtiger THG-Emissionen hinaus die Entwicklung im Zeitverlauf überprüft und die Erreichung von THG-Reduktionszielen dokumentiert werden.

Die Methodik des GHG Protocols beschränkt sich bisher vornehmlich auf die Offenlegung der Klimawirkung von Produktions- und Distributionsprozessen von Waren sowie der Bereitstellung und Inanspruchnahme von Dienstleistungen. Die Erfassung von aus der Landnutzung resultierenden THG-Emissionen z. B. beim Bezug von tierischen oder pflanzlichen Rohstoffen ist bisher eher unterrepräsentiert (Pankaj Bhatia et al., 2011; WRI & WBCSD, 2014). Mit der in der Pilotphase befindlichen „Land Sector and Removals Guidance“ wird diese Lücke geschlossen (WRI & WBCSD, 2022a). Als Ergänzung zu den bestehenden Regelungen wird die Berücksichtigung der Richtlinie empfohlen („should“) aber nicht verpflichtend vorgeschrieben („shall“) (WRI & WBCSD, 2022a). Für Unternehmen, die im wesentlichen Umfang drainierte Moore wirtschaftlich nutzen, würde die Anwendung der Richtlinie ihre Treibhausgasbilanz deutlich verschlechtern, weshalb gerade für diese Unternehmen kaum ein Anreiz besteht, die Richtlinie anzuwenden. Dies könnte sich dadurch ändern, dass der Gesetzgeber (z. B. in der CSRD) zur Anwendung der entsprechenden Regelungen verpflichtet oder der Druck von Stakeholdern zur Berücksichtigung steigt. Die unternehmerische Erfassung von THG-Emissionen und die darauf aufbauende Anfertigung von Nachhaltigkeits- bzw. THG-Berichten wird im Folgenden als **unternehmerische THG-Berichterstattung** bezeichnet.

Sowohl die nationale als auch die unternehmerische Ermittlung verursachter THG-Emissionen zielt auf ihre systematische Erfassung ab. **Moorklimaschutzprojektstandards** sind hingegen darauf ausgerichtet, die Auswirkungen einer Intervention gegenüber einem Referenzszenario ohne Intervention abzuschätzen. Die Quantifizierung der THG-Emissionen stellt in diesem Zusammenhang die Grundlage der öffentlichen wie privatwirtschaftlichen, ergebnisbasierten Finanzierung von Emissionsminderungen (in t CO₂eq) dar. Vor der Durchführung eines Projektes (ex ante) dient sie der Wirkungsabschätzung und Priorisierung von Maßnahmen. Im Nachhinein (ex post) dient sie als Nachweis der Wirksamkeit durchgeführter Projekte. Auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt werden THG-Emissionsminderungen in Form von THG-Zertifikaten gehandelt und zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt (siehe hierzu Hohlbein & Couwenberg, 2019; Machnik et al., 2022; von Unger et al., 2022).

3.1.2 Temporaler Bezug

Die drei untersuchten THG-Erfassungsansätze unterscheiden sich in Form ihres temporalen Bezuges. Sowohl die nationale als auch die unternehmerische THG-Berichterstattung nehmen eine vergangenheitsorientierte Perspektive ein. Sie betrachten die bereits entstandenen THG-Emissionen. Die Projektstandards sind zukunftsorientiert. Sie projizieren potentielle Emissionsreduktionen. Im Nachgang überprüfen sie die Erreichung der Projektionen (Tabelle 2).

Sowohl im Rahmen der nationalen als auch der unternehmerischen THG-Berichterstattung wird jährlich bis zweijährlich ein Bericht erstellt, der die THG-Emissionen eines vorangegangenen Kalenderjahres abbildet. Ausgehend von einem Referenzjahr wird eine Zeitreihe erstellt, auf dessen Grundlage die **Entwicklung der THG-Emissionen** beurteilt werden kann. Die Beurteilung der THG-Emissionsentwicklung ist an die Vergleichbarkeit der Werte verschiedener Jahre gekoppelt. Diese ist nur gegeben, wenn die Werte in jedem Jahr mit der gleichen Methodik berechnet wurden. Anpassungen in der Methodik erfordern daher die Neuberechnung der gesamten Zeitreihe des nationalen THG-Inventares (IPCC, 2006, Vol. 1, Kap. 5) bzw. des selbst gewählten Referenzjahres unter den Standards des GHG Protocol (Ranganathan et al., 2004). Neben Anpassungen in der Erfassungsmethodik stellen beim GHG Protocol auch Veränderungen in den Organisationsgrenzen (z. B. Veräußerung eines Unternehmensteils) einen Grund für die Neuberechnung der THG-Emissionen dar. Die Neuberechnung hat in beiden Ansätzen so genau wie möglich zu erfolgen. Liegen aus vergangenen Jahren keine ausreichenden Informationen für die identische Anwendung der aktualisierten Methodik vor, beinhalten die Richtlinien des IPCC (2006, Vol. 1, Kap. 5) eine Reihe von Näherungsansätzen.

Auf Grundlage der nationalen THG-Inventardaten werden auch Projektionen zukünftiger THG-Emissionen entwickelt (Harthan et al., 2023). Die Betrachtung zukünftiger Treibhausgasflüsse ist allerdings nicht der primäre Zweck des Inventars und wird hier deshalb nicht als solcher aufgenommen.

Tabelle 2: THG-Erfassungsansätze: Temporaler Bezug

THG-Erfassungsansatz	Zeitliche Perspektive	Betrachteter Zeitraum
THG-Inventarbericht ¹	Vergangenheit / Gegenwart	1990 bis 2 Jahre vor dem Berichtsjahr
Moorklimaschutzprojekte ^{2,3}	Projektion: Zukunft Kontrolle: Vergangenheit	20 – 100 Jahre
GHG Protocol ⁴	Vergangenheit / Gegenwart	Referenzjahr bis Gegenwart

Quellen: (1) IPCC (2006), (2) MoorFutures (2017), (3) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (4) (Ranganathan et al., 2004).

Zur **Projektion zukünftiger THG-Emissionsreduktionen** in Moorklimaschutzprojekten schreiben alle Projektstandards die Erstellung zweier Szenarien vor (Tabelle 3). Zum einen ist ein *Referenzszenario* zu erstellen, in welchem die Entwicklung der THG-Emissionen ohne die Durchführung von Moorklimaschutzmaßnahmen projiziert wird. Unter den Standards von Moorland und PCC wird davon ausgegangen, dass sich die Aktivitätsdaten im Vergleich zum Projektbeginn nicht verändern – statische Projektion. Bei VCS dürfen Erhöhungen der THG-Emissionen durch häufiger auftretende Moorbrände mitberücksichtigt werden. Bei MoorFutures können Änderungen (In- und Extensivierungen) der Landnutzung im Referenzszenario projiziert werden. Eine Veränderung der THG-Emissionen durch Abnahme der Moormächtigkeit wird bei Moorbenefits 2.0 und PCC mitberücksichtigt. Die übrigen Standards setzen lediglich eine Betrachtung des Torferschöpfungszeitraumes im Referenzszenario voraus (siehe unten).

Neben dem Referenzszenario ist ein *Projektszenario* zu erstellen. In diesem wird die Entwicklung der THG-Emissionen bei Durchführung des jeweiligen Moorklimaschutzprojektes projiziert. Bei Moorland, MoorFutures und PCC erfolgt die Projektion der THG-Emissionen statisch. Es ist also ein Zielzustand mit den erwarteten jährlichen THG-Emissionen anzugeben. Bei VCS kann die Projektion der THG-Emissionen dynamisch erfolgen, indem für jedes Jahr ein eigener Emissionsfaktor bestimmt wird. Subtrahiert man die THG-Emissionen des Projektszenarios von den THG-Emissionen des Referenzszenarios, erhält man die erwartbaren THG-Emissionsminderungen.

Ob die projizierten THG-Emissionsminderungen tatsächlich erzielt werden, ist in regelmäßigen Abständen im Rahmen eines **Monitorings** zu überprüfen. Wird entweder das Projektszenario verfehlt oder stellt sich heraus, dass die THG-Emissionen des Referenzszenarios überschätzt wurden, müssen die projizierten THG-Emissionsminderungen entsprechend verringert werden. Es folgt, dass auch in Ansätzen, in welchen im Vorhinein lediglich *ein* Zielzustand projiziert wird, im Nachhinein die sukzessive Entwicklung einer Fläche berücksichtigt wird. Neben den in Tabelle 3 angegebenen Monitoring Intervallen empfehlen Moorland und VCS eine kontinuierliche Erfassung des Grundwasserflurabstandes.

Tabelle 3: THG-Erfassungsansätze: Projektion und Monitoring von Szenarien in Moorklimaschutzprojektstandards

THG-Erfassungsansatz	Projektion Referenzszenario	Projektion Projektszenario	Monitoring Intervall in Jahren
MoorFutures ¹	Dynamisch	Statisch	Nach 3 – 5, danach alle 10
Moorbenefits 2.0 ²	Dynamisch	k.A.	Nach 1, 3, 5, 10, danach alle 10
Moorland ³	Statisch	Statisch	Sehr umfangreich, siehe (4)
Peatland Carbon Code ^{5,6}	Statisch	Statisch	Nach 5, danach alle 10
Verified Carbon Standard ^{7,8}	Dynamisch	Dynamisch	Nach 2, 5, danach alle 5

Quellen: (1) MoorFutures (2017), (2) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (3) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-a), (4) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-b), (5) IUCN National Committee United Kingdom (2023), (6) UK Centre for Ecology & Hydrology & The James Hutton Institute (2023), (7) Verra (2017), (8) UNFCCC & CCNUCC (2007).

Zurzeit ist der Zustand eines Moores unmittelbar vor Beginn eines Moorklimaschutzprojektes zur Projektion des Referenzszenarios heranzuziehen. Bereits laufende Projekte wären damit von einer Förderung ausgeschlossen. Auf europäischer Ebene werden im Rahmen des Carbon Removal Certification Frameworks regionale **Standardreferenzszenarios** diskutiert. Dies hätte

den Vorteil, dass auch solche Akteure finanzielle Unterstützung für das Management nasser Moore erhalten könnten, die bereits vor Etablierung von Förderprogrammen Flächen wiedervernässt haben. Auf der anderen Seite geht von standardisierten Referenzszenarien die Gefahr der ineffizienten Mittelverteilung aus. Der Wiedervernässung von Mooren mit niedrigeren Emissionen würde ein größerer THG-Emissionsminderungseffekt zugesprochen werden, als er in dem betrachteten Zeitraum tatsächlich erbracht wird. Die Wiedervernässung von Mooren mit besonders hohen Emissionen würde hingegen nicht ausreichend honoriert werden.

3.1.3 Geographischer Bezug

Die untersuchten THG-Erfassungsansätze sind in unterschiedlichen Regionen der Erde anwendbar und auf die Betrachtung verschiedengroßer Untersuchungsgebiete ausgelegt (Tabelle 4). Aufgrund unterschiedlicher Moorbodendefinitionen kann sich die betrachtete Fläche auch bei für die gleiche Region geltenden Ansätzen unterscheiden (Tabelle 5).

Sowohl die Standards der nationalen als auch der unternehmerischen THG-Berichterstattung haben ein globales **Anwendungsgebiet**. Ab 2024 werden von fast allen Ländern der Erde THG-Inventarberichte angefertigt (UNFCCC, 2024). Das GHG Protocol findet beispielsweise als methodische Grundlage der SBTi auf allen Kontinenten der Erde Anwendung (SBT, 2023).

Im Gegensatz dazu haben die untersuchten Moorklimaschutzprojektstandards jeweils ein begrenztes Anwendungsgebiet. Bei MoorFutures, Moorbenefits 2.0 und Moorland handelt es sich um in Deutschland verbreitete Regionalstandards. PCC wird in Großbritannien verwendet. VCS stellt einen global verbreiteten THG-Kompensationsstandard dar. Die Umsetzung von Moorklimaschutzprojekten beschränkt sich zurzeit allerdings auf die gemäßigte und tropische Klimazone. Eine Ausweitung auf die boreale Klimazone ist in Planung (Verra, 2024). Der Fokus liegt im Folgenden auf der Methodologie für die gemäßigte Klimazone (Verra, 2017).

Die betrachteten **Untersuchungsgebiete** reichen vom Gebiet eines Staates (nationale THG-Berichterstattung) über die Grenzen eines Unternehmens (GHG Protocol) bis zur Projektfläche eines Moorklimaschutzprojektes. Während die Untersuchungsgebiete in der nationalen THG-Berichterstattung und in Moorklimaschutzprojekten mit wenigen Ausnahmen (z. B. ungeklärte Gebietsansprüche) eindeutig definiert werden können, gibt es bei der Definition von Organisationsgrenzen und berücksichtigten THG-Emissionsquellen in der unternehmerischen THG-Berichterstattung Spielräume.

Die Definition von **Organisationsgrenzen** ist immer dann von besonderer Relevanz, wenn ein Unternehmen einen Verbund mehrerer rechtlicher Einheiten darstellt bzw. an anderen Unternehmen (Tochterunternehmen) beteiligt ist. In diesem Zusammenhang werden drei Abgrenzungsansätze unterschieden, aus denen ein Unternehmen einen auswählen darf. Kombinationen sind nicht zulässig. Im ersten Ansatz ist die *finanzielle Kontrolle* maßgeblich für die Definition der Organisationsgrenzen. Ein Unternehmen erfasst die kompletten Emissionen der Unternehmensteile und Tochterunternehmen, über die es die finanzielle Entscheidungshoheit hat. Es ist dabei unerheblich, wie hoch der Anteil des berichterstattenden Unternehmens am Eigenkapital eines Tochterunternehmens ist. Es werden immer 100 % der THG-Emissionen berichtet. Im Gegensatz dazu bestimmt der Anteil am Eigenkapital eines anderen Unternehmens im *Equity Share Ansatz* den Anteil der THG-Emissionen der vom berichterstattenden Unternehmen zu übernehmen ist. Die finanzielle Entscheidungshoheit ist in diesem Fall nicht relevant. Der dritte Ansatz ist unabhängig von den finanziellen Besitzansprüchen in einem Unternehmensverbund. In diesem bestimmt die *operationelle Kontrolle* darüber, ob die THG-Emissionen eines Tochterunternehmens in die THG-

Berichterstattung einzubeziehen sind oder nicht. Wie beim Ansatz der finanziellen Kontrolle werden entweder die kompletten THG-Emissionen (Kontrolle über die operativen Tätigkeiten) oder gar keine THG-Emissionen berichtet (Ranganathan et al., 2004).

Die klare Abgrenzung des Unternehmens von seinem wirtschaftlichen Umfeld stellt die Voraussetzung für die **Zuordnung von THG-Emissionen zu einem Unternehmen** dar. Es werden drei Arten von durch ein Unternehmen verursachten THG-Emissionen unterschieden („Scopes“). Innerhalb der Grenzen eines Unternehmens direkt verursachte Emissionen werden als Scope 1 Emissionen bezeichnet. Bei den Scope 2 Emissionen handelt es sich um jene THG-Emissionen, die bei der Bereitstellung von Energie für ein berichterstattendes Unternehmen anfallen. Zu den Scope 3 Emissionen zählen alle übrigen THG-Emissionen, die durch ein berichterstattendes Unternehmen verursacht werden, aber weder direkt aus den Unternehmensaktivitäten resultieren, noch bei der Bereitstellung von Energie anfallen. Dies beinhaltet die THG-Emissionen, die bei der Bereitstellung von Vorprodukten entstehen (Ranganathan et al., 2004).

Gemäß GHG Protocol sind die Scope 1 und Scope 2 Emissionen zwingend zu erfassen (Ranganathan et al., 2004). Die Scope 3 Emissionen können hingegen optional erfasst werden (Pankaj Bhatia, Cynthia Cummis, David Rich, et al., 2011). Wenn sich Unternehmen unter der SBTi Ziele setzen wollen, müssen die Scope 3 Emissionen verpflichtend erfasst werden (SBT, 2024). Umfassen sie mindestens 40 % der Gesamtemissionen eines Unternehmens, müssen auch Reduktionsziele für sie formuliert werden (SBT, 2024).

Tabelle 4: THG-Erfassungsansätze: Geographischer Bezug

THG-Erfassungsansatz	Anwendungsgebiet	Ausdehnung Untersuchungsgebiet
THG-Inventarbericht		
Minimalstandard (Tier 1) ¹	Global, alle Unterzeichner des ÜvP	National
Ausgestaltung Deutschland ²	Deutschland	National
Moorklimaschutzprojekte		
MoorFutures ³	Norddeutschland	Regional, Projektfläche, min. 5-10 ha
Moorbenefits 2.0 ⁴	Bayern	Regional, Projektfläche
Moorland ⁵	Niedersachsen	Regional, Projektfläche, min. 10 ha
Peatland Carbon Code ⁶	Großbritannien	Regional, Projektfläche
Verified Carbon Standard ⁷	Gemäßigte und tropische Klimazone	Regional, Projektfläche
GHG Protocol		
GHG Protocol ⁸	Global	Scope 1: Vom Unternehmen kontrolliertes Gebiet Scope 2/3: Durch Dritte für Unternehmen genutztes Gebiet

Quellen: (1) UNFCCC, (2024) (2) UBA, (2024c), (3) Moorfutures (2017), (4) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (5) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.), (6) IUCN National Committee United Kingdom (2023c), (7) Verra (2017), (8) Ranganathan et al.(2004).

3.1.4 Berücksichtigte Moorböden

Neben dem potentiellen Anwendungsgebiet und der Ausdehnung eines Untersuchungsgebietes unterscheidet sich der geographische Bezug der THG-Erfassungsansätze in der Abgrenzung berücksichtigter Moorböden (Tabelle 5).

Sowohl die IPCC Richtlinien der nationalen THG-Berichterstattung als auch das GHG Protocol grenzen Moorböden von Mineralböden gemäß der modifizierten **FAO Definition organischer Böden** ab (siehe Kapitel 2.1). In der „Land Sector and Removals Guidance“ des GHG Protocol bleibt offen, ob es Unternehmen alternativ auch möglich ist, auf nationale Moorbodendefinitionen zurückzugreifen (WRI & WBCSD, 2022a). Diese Möglichkeit wird Staaten bei der Erstellung von nationalen THG-Inventarberichten eingeräumt (IPCC, 2006, Vol. 4, Kap. 3). In der deutschen THG-Berichterstattung werden auch An- und Abmoore den kohlenstoffreichen Böden zugeordnet.

Keiner der untersuchten Moorklimaschutzprojektstandards verweist explizit auf eine dem Standard zugrundeliegende Moorbodendefinition. Dies äußert sich vor allem in der fehlenden Angabe, ab welchem **Anteil organischer Substanz** ein Boden als Moorboden gilt. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass sowohl Hoch- als auch Niedermoorböden in das Projektgebiet eingebracht werden dürfen. An- und Abmoore werden nicht genannt. Stattdessen wird die **Genese des organischen Kohlenstoffs** als zentrales Kriterium für die Eignung eines Bodens für ein Moorklimaschutzprojekt herausgestellt. Es können nur solche Böden unter den Projektstandards wiedervernässt werden, deren organischer Kohlenstoff in Abwesenheit von Sauerstoff unter wassergesättigten Bedingungen akkumuliert wurde und durch Oxidation verloren ginge. Dies ist vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.1 geäußerten Kritik an der FAO Definition organischer Böden zu begrüßen. Auch wenn es nicht explizit benannt ist, gehen wir in Tabelle 5 davon aus, dass die im jeweiligen Land definierten Mindestgehalte organischer Bodensubstanz als Untergrenze für die Eignung eines Bodens für ein Moorklimaschutzprojekt gelten. Der international anwendbare VCS empfiehlt den Rückgriff auf nationale Definitionen.

Sowohl das nationale THG-Inventar als auch das GHG Protocol definieren Böden mit geringen **Torfmächtigkeiten** sowie verhältnismäßig niedrigen Kohlenstoffgehalten als Moorböden. Dies hängt damit zusammen, dass auch solche Böden im entwässerten Zustand große THG-Quellen sind (siehe Kapitel 2.1, 2.2.2) und eine Unterschätzung der verursachten THG-Emissionen in beiden Ansätzen auszuschließen ist. Bei Moorklimaschutzprojektstandards hängt die Projektion potentieller THG-Emissionsminderungen längerfristig wesentlich von der (noch) im Boden befindlichen Kohlenstoffmenge ab. Die Anforderungen an die minimale Torfmächtigkeit als Indikator der gespeicherten Kohlenstoffmenge sind daher höher. Sie orientieren sich an der Projektlaufzeit und den Torfverlusten im Referenzszenario. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass THG-Emissionsminderungen nur so lange berichtet werden, wie im Referenzszenario noch Torf mineralisiert worden wäre. Da mit Ausnahme von Moorland von der Minimallaufzeit abgewichen werden kann, muss neben den festgelegten Mindesttorfmächtigkeiten auch die Torferschöpfungszeit im Referenzszenario geprüft und der angestrebten Projektlaufzeit gegenübergestellt werden. Die Torferschöpfungszeit entspricht der Torfmächtigkeit (in cm) geteilt durch die die unter entwässerten Bedingungen jährlich auftretenden Torfverluste (in cm/a). Wäre der Torf in einzelnen Bereichen eines Projektgebietes im Referenzszenario bereits vor Ablauf der Projektlaufzeit erschöpft, können diese Torfverluste und assoziierten Emissionen nur bis zur Erschöpfung mitberücksichtigt werden. Einzelne Standards begrenzen den Umfang solcher Bereiche (z. B. PCC höchstens 25 % der Fläche). Zur Berechnung der Torferschöpfungszeit im Referenzszenario werden pauschale jährliche Sackungsverluste sowohl bei MoorFutures (1 cm/a) als auch bei PCC (1 cm/a Hochmoore, 1,5 cm/a Niedermoore) angegeben. Bei VCS muss eine begründete Einschätzung der Sackungsverluste durch das

Projektteam (Expertenschätzung, Literatur, historische Daten) erfolgen. MoorFutures und VCS ziehen das Konzept der Torferschöpfungszeit auch zur Sicherstellung der Permanenz der THG-Minderungen heran. Sollten auch im Projektszenario Torfverluste auftreten, dürfen diese nicht dazu führen, dass sich der Torf innerhalb von 100 Jahren komplett abbaut.

Auch die Anforderungen an die **Landnutzung vor einer Wiedervernässung** variieren zwischen den Ansätzen. Während beim GHG Protocol und bei der nationalen THG-Berichterstattung alle anthropogen beeinflussten Moore zu berücksichtigen sind, beziehen sich die Projektstandards auf spezifische Nutzungsformen oder schließen einzelne Formen aus (z. B. Ausschluss von Wald bei MoorFutures und PCC). Des Weiteren können Böden mit einer profitablen Vornutzung nur eingeschränkt in Moorklimaschutzprojekte eingebracht werden (Moorland, VCS). Die Beschränkung der Nutzungsformen hängt mit dem Fehlen belastbarer Daten hinsichtlich der Emissionsentwicklung im Fall einer Wiedervernässung zusammen. Der Fokus auf unprofitable Vornutzungsformen zielt auf die Vermeidung von Verlagerungseffekten und der damit einhergehenden Erhöhung der THG-Emissionen in einem anderen Moorgebiet („leakage“) ab.

Tabelle 5: THG-Erfassungsansätze: Berücksichtigte Moorböden

THG-Erfassungsansatz	Mindestgehalt org. Bodensubstanz	Minimale Torfmächtigkeit	Weitere Anforderungen
THG-Inventarbericht			
Minimalstandard (Tier 1)	20 – 35 % ¹	10 cm ¹	Anthropogene Beeinflussung ²
Ausgestaltung Deutschland	15 % ³	10 cm ³	Anthropogene Beeinflussung ²
Moorklimaschutzprojekte			
MoorFutures	30 %*	Keine, aber Berücksichtigung der Torferschöpfungszeit (max. Anrechnungszeit, Permanenz) ⁴	Entwässerte Moore, nicht baumbestanden ⁴
Moorbenefits 2.0	30 %*	20 cm Hochmoore, 30 cm Niedermoore, Berücksichtigung der Torferschöpfungszeit (max. Anrechnungszeit) ⁵	Entwässerte Hoch- und Niedermoore ⁵
Moorland	30 %*	30 cm, bevorzugt 50 cm ⁶	Entwässerte Hoch- und Niedermoore, Nutzungsaufgabe erfolgt oder angestrebt ⁶
Peatland Carbon Code	20 – 25 % / 35 % / 60 %**	30 cm Hochmoore, 45 cm Niedermoore, Berücksichtigung der Torferschöpfungszeit (max. Anrechnungszeit) ⁷	Entwässerte Hoch- und Niedermoore, ohne Nutzung bzw. unter landwirtschaftlicher Nutzung ⁷

THG-Erfassungsansatz	Mindestgehalt org. Bodensubstanz	Minimale Torfmächtigkeit	Weitere Anforderungen
Verified Carbon Standard	International anerkannte Definition (z. B. des Projektlandes/ der FAO) ⁸	International anerkannte Definition, Berücksichtigung der Torferschöpfungszeit (max. Anrechnungszeit, Permanenz) ⁹	Entwässerte Moore der Landnutzungsformen Wald, Landwirtschaft, Torfabbau unter Ausschluss von Verlagerungseffekten bzw. nach Übergangszeit ohne Nutzung ⁹
GHG Protocol			
GHG Protocol ¹⁰	20 – 35 %	10 cm	Anthropogene Beeinflussung

* Werte gemäß deutscher Moorbodendefinition (Eckelmann et al., 2005).

**Werte gemäß regionaler Moorbodendefinitionen von England und Wales (min. 20-25% organische Substanz), Nordirland (min. 35% organische Substanz) und Schottland (min. 60% organische Substanz) (JNCC, 2011).

Quellen: (1) IPCC (2006, Vol. 4, Kap. 3), (2) IPCC (2006, Vol. 1, Kap. 1), (3) UBA, 2024c), (4) MoorFutures (2017), (5) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (6) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.), (7) IUCN National Committee United Kingdom (2023c), (8) Verra (2023) (9) Verra (2017) (10) WRI & WBCSD, 2022a).

3.2 Methoden

3.2.1 Methodische Grundsätze

Jeder THG-Erfassungsansatz verfügt über ein eigenes Regelwerk, in welchem die methodischen Anforderungen an die Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren festgehalten sind. Der Grad der Ausdifferenzierung der Anforderungen variiert in Abhängigkeit des Einsatzbereiches des jeweiligen Ansatzes.

Das **GHG Protocol** stellt einen sehr breit anwendbaren Standard für die unternehmerische THG-Berichterstattung dar. Die methodischen Vorgaben bezüglich der Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren sind daher verhältnismäßig allgemein formuliert. Auch die neue „Land Sector and Removals Guidance“ trägt der breiten Verwendung des GHG Protocol und den Herausforderungen bei der Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren Rechnung. Sie gibt einen Überblick über die gängigen THG-Erfassungsmethoden, und orientiert sich dabei an den IPCC Richtlinien für die nationale THG-Berichterstattung. Falls nur Netto-THG-Emissionen berichtet werden sollen, macht das GHG Protocol keine Vorgaben, welche Methode zu verwenden ist. Die methodische Genauigkeit sollte allerdings der Informationslage angepasst werden. Möchte ein Unternehmen *zusätzlich* zu den verursachten Landnutzungsemissionen auch THG-Einbindungen berichten, muss ein Tier 3 Ansatz (modellbasiert) verwendet werden (siehe Kapitel 2.3.2, WRI & WBCSD, 2022b, S.56ff.).

Für die **nationale THG-Berichterstattung** sind die IPCC Guidelines, insbesondere IPCC (2006, Vol.4) und das Wetlands Supplement (IPCC, 2014) heranzuziehen. Die methodischen Anforderungen sind wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben genauer definiert als im GHG Protocol. Handelt es sich bei Mooren um eine Key Category, ist ein Tier 2 oder Tier 3 Ansatz zu verwenden. Handelt es sich nicht um eine Key Category kann sowohl im Fall von Netto-THG-Emissionen als auch im Fall von Netto-THG-Einbindungen auf einen Tier 1 Ansatz zurückgegriffen werden.

Die **Moorklimaschutzprojektstandards** definieren die anzuwendende THG-Erfassungsmethodik am genauesten. Dies gilt sowohl für die Anforderungen an die überwiegend

im Feld stattfindende Erhebung von Aktivitätsdaten als auch für die Definition regionaler Emissionsklassen bzw. statistischer Modelle. Alle Moorklimaschutzprojektstandards entsprechen folglich mindestens den Anforderungen an einen Tier 2 Ansatz.

THG-Emissionen werden auch in **öffentlich finanzierten Moorschutzprojekten** erfasst. Ein sehr umfangreiches Bündel von Moorschutzprojekten stellen die über 10 Jahre vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanzierten „Modell- und Demonstrationsvorhaben zur Wiedervernässung von Mooren und der Nutzung von Paludikulturen“ und die ebenfalls über 10 Jahre vom Bundesministerium für Umwelt-, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) finanzierten „Pilotvorhaben zum Moorbodenschutz“ dar. Die THG-Erfassungsmethodik dieser Projekte unterscheidet sich durch die intensive wissenschaftliche Begleitung und die Durchführung von kostenintensiven Hauben- und Eddy-Kovarianz-Messungen von den übrigen THG-Erfassungsansätzen (Tiemeyer, 2024). Eine Übertragbarkeit ist in absehbarer Zeit ausgeschlossen. Die Methodik wird in den folgenden Methodenvergleich daher nicht einbezogen.

Die THG-Messung in öffentlichen Moorschutzprojekten zielt ebenso wie die nationale THG-Berichterstattung auf eine **realitätsnahe Abschätzung** der Netto-THG-Emissionen ab. Im Gegensatz dazu folgen sowohl das GHG Protocol als auch die Moorklimaschutzprojektstandards dem Grundsatz der **Konservativität**. Im GHG Protocol sollen Emissionen überschätzt und THG-Einbindungen unterschätzt werden. In Moorklimaschutzprojekten sollen die Emissionsminderungen unterschätzt werden. Neben dem Grundsatz der Konservativität formulieren die Moorklimaschutzprojektstandards ebenso wie das GHG Protocol weitere **Grundprinzipien**, die eine glaubwürdige Kommunikation verursachter bzw. kompensierter THG-Emissionen für die beteiligten Akteure sicherstellen sollen. Auf diese Prinzipien kann im vorliegenden Bericht nicht genauer eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung findet sich bei Hohlbein & Couwenberg (2019), von Unger et al. (2019) sowie (WRI & WBCSD, 2022a).

3.2.2 Räumliche Auflösung

Die Berücksichtigung der Vielfalt unterschiedlicher Moorstandorte erfordert die Unterteilung eines Untersuchungsgebietes. Je feiner die Unterteilung, desto höher die Genauigkeit der Emissionsabschätzung (Tabelle 6). In der nationalen THG-Berichterstattung und bei Moorklimaschutzprojekten hängt sie vornehmlich von der Auflösung der berücksichtigten Aktivitätsdaten ab. Dies gilt auch für die Scope 1 Emissionen der unternehmerischen THG-Berichterstattung. Im Bereich der Scope 3 Emissionen ist die Rückverfolgbarkeit der bezogenen Leistungen maßgebend. Hier besteht die zentrale Herausforderung zunächst darin, den Anteil von Mooren an der insgesamt beanspruchten Fläche zu bestimmen.

Erfolgt die Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren für das **nationale THG-Inventar** nach dem Minimalstandard (Tier 1), werden lediglich die groben Emissionsklassen des Wetlands Supplement unterschieden (IPCC, 2014). Für die Abschätzung der THG-Emissionen ist somit die Gesamtfläche einer Emissionsklasse zu ermitteln und mit dem dazugehörigen Emissionsfaktor zu verrechnen. Hierbei kann auf international verfügbare Datensätze zurückgegriffen werden. Im Bereich der Landnutzung liegen auch auf globaler Ebene Datensätze mit einer hohen räumlichen Auflösung vor (siehe Kapitel 2.2.3). Die Verbreitung von Mooren ist auf globaler Ebene weniger hoch aufgelöst dargestellt. Die „Global Peatland Map 2.0“ bildet die weltweite Verbreitung von Mooren beispielsweise in einem 0,5*0,5 km Raster ab (Barthelmes et al., 2024).

Werden höhere tier-Ansätze gewählt, wird vornehmlich auf nationale Datensätze zurückgegriffen. Damit kann die Darstellung der Moorverbreitung zumeist mit räumlich höherer Auflösung erfolgen. Außerdem ermöglicht es den Einbezug weiterer Aktivitätsdaten, für die auf

internationaler Ebene keine Datensätze vorliegen. Bei der Erfassung von THG-Emissionen aus Mooren für das **deutsche THG-Inventar** wird sowohl für die Verbreitung der Moore als auch für die Darstellung der Landnutzung auf hochaufgelöste Vektordatensätze zurückgegriffen (AdV, 2018; Wittnebel et al., 2023). Des Weiteren werden die durchschnittlichen Jahres-Grundwasserflurabstände auf Grundlage anderer Standortparameter mittels eines statistischen Modells in einem 100*100 m Raster abgeschätzt. (Bechtold et al., 2014; Tiemeyer, 2024). Unter der Annahme, dass jeder Punkt den Grundwasserflurabstand eines den Punkt umgebenden 100*100 m Quadrates widerspiegelt, werden die Schätzungen in die Fläche übertragen. Dieses Vorgehen erhöht die räumliche Auflösung der THG-Emissionserfassung deutlich, da die THG-Emissionen für jedes Quadrat individuell abgeschätzt werden können.

In **Moorklimaschutzprojekten** erfolgt die Erfassung von THG-Emissionen ebenfalls sehr kleinräumig. Im Gegensatz zu der THG-Erfassung im Rahmen der deutschen THG-Berichterstattung werden relevante Standortfaktoren nicht in einem festen Raster erfasst. Stattdessen werden die Flächen gemäß der vorherrschenden Vegetation unterteilt (Stratifizierung). Sollten über die Vegetation hinaus Standortfaktoren (z. B. PCC: Grundwasserflurabstand) erfasst werden, geschieht dies an Punkten, die repräsentativ für die einzelnen Teilflächen sind. Sollte ein Projektgebiet nicht stratifiziert werden, ist begründet darzulegen, dass es sich um ein homogenes Gebiet handelt. Da die Torfmächtigkeit nur im Fall besonders geringer Mächtigkeiten mit der Vegetation zusammenhängt, wird diese in einem festen Raster erfasst (genaue Vorgaben bei PCC, VCS) bzw. aus Karten entnommen.

In Moorklimaschutzprojekten sind die zu berücksichtigenden Gebiete über einen langen Zeitraum klar definiert. Sofern keine grundlegenden Änderungen an der Moorbodendefinition oder der Kartierungsmethode vorgenommen werden, gilt dies auch für die nationale THG-Berichterstattung. Eine konsistente räumliche Auflösung ist unter Einbezug gegenwärtig und voraussichtlich auch in der Zukunft verfügbarer Informationen und Entwicklungen gesichert. Anders ist dies bei der **unternehmerischen THG-Berichterstattung**. Hier kann sich die Herkunft bezogener Leistungen und damit auch der Grad an für die THG-Emissionserfassung verfügbaren Informationen fortlaufend ändern. Das GHG Protocol beinhaltet daher keine pauschalen Vorgaben hinsichtlich der räumlichen Auflösung der THG-Emissionserfassung. Stattdessen schreibt es vor, dass eine konsistente THG-Erfassung auch über mehrere Jahre hinweg sichergestellt sein soll. Zur Bewertung der räumlichen Auflösung definiert es fünf Stufen (WRI & WBCSD, 2022b, S.17): Wird erwartet, dass die Informationen entweder bezüglich der Herkunft einer Leistung oder bezüglich der für die Erfassung von THG-Emissionen notwendigen Aktivitätsdaten stark begrenzt sind, stehen grobe räumliche Auflösungen wie die *globale Ebene* bzw. die *Ebene der Verwaltungs- oder Beschaffungsregion* zur Wahl. Eine hohe räumliche Auflösung ist darstellbar, wenn die Herkunft bezogener Leistungen bis zu einer einheitlich gemanagten *Landnutzungseinheit* oder bis zur tatsächlich für die Bereitstellung von Leistungen *bewirtschafteten Fläche* zurückverfolgt werden kann und für diese Gebiete Aktivitätsdaten zur Verfügung stehen. Die Abschätzung von THG-Emissionen mit einer hohen räumlichen Auflösung erscheint im Bereich der Scope 3 Emissionen nur dann realisierbar, wenn langfristige Handelsbeziehungen bestehen und die Erfassung von Aktivitätsdaten finanziell honoriert wird. Im Bereich der Scope 1 Emissionen ist eine flächenscharfe Rückverfolgung möglich. Die Erfassung von Aktivitätsdaten ist in diesem Fall die größere Herausforderung.

Tabelle 6: THG-Erfassungsansätze: Räumliche Auflösung

THG-Erfassungsansatz	Grad der räumlichen Auflösung	Betrachtete Einheit
THG-Inventarbericht		

THG-Erfassungsansatz	Grad der räumlichen Auflösung	Betrachtete Einheit
Minimalstandard (Tier 1)	Niedrig	Aggregierte Betrachtung aller Flächen aller Emissionsklassen ¹
Ausgestaltung Deutschland	Hoch	100*100 m Raster ²
Moorklimaschutzprojekte		
MoorFutures	Sehr hoch	Stratifizierung gemäß Vegetation ³
Moorbenefits 2.0	K.A.	K.A.
Moorland	Sehr hoch	Stratifizierung gemäß Vegetation ⁴
Peatland Carbon Code	Sehr hoch	Stratifizierung gemäß Vegetation, Torfmächtigkeit in 100*100 m Raster ⁵
Verified Carbon Standard	Sehr hoch	Stratifizierung gemäß Vegetation Torfmächtigkeit in 100*200 bis 500 m Raster (wenn keine Karte vorhanden) ⁶
GHG Protocol		
GHG Protocol	Niedrig – hoch	Konsistente Bestimmung der von einem Unternehmen beanspruchten Flächen: Global Ebene – tatsächlich beanspruchte Flächen ⁷ Stratifizierung so exakt wie möglich ⁸

Quellen: (1) IPCC (2014), (2) Tiemeyer, B. (persönliche Kommunikation, 03.04.2024), (3) MoorFutures (2017), (4) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-a) (5) IUCN National Committee United Kingdom (2023b), (6) Verra (2017), (7) WRI & WBCSD (2022a)), (8) WRI & WBCSD (2022b, S.55ff.).

3.2.3 Erfassung von Aktivitätsdaten

Die Abschätzung der THG-Emissionen eines Moorstandortes basiert in allen untersuchten THG-Erfassungsansätzen auf Aktivitätsdaten (Kapitel 2.2.2, Tabelle 7). Sowohl in den Moorklimaschutzprojektstandards als auch in den Standards der nationalen THG-Berichterstattung ist definiert, welche Aktivitätsdaten wie zu erfassen sind. Lediglich das GHG Protocol lässt die zu berücksichtigenden Aktivitätsdaten und deren Erfassung offen. Hierbei handelt es sich um eine nachvollziehbare Konsequenz der freien Erfassungsmethodenwahl.

Sowohl die Moorklimaschutzprojektstandards als auch die Standards der nationalen THG-Berichterstattung berücksichtigen die **klimatische Lage** der Moorstandorte. Bei den regionalen Projektstandards und der THG-Berichterstattung Deutschlands resultiert dies aus der räumlichen Beschränkung auf Teile der gemäßigten Klimazone. Bei VCS resultiert es aus der Beschränkung der untersuchten Methodologie auf die gesamte gemäßigte Klimazone. Die Klimazonen stellen auch bei den Emissionsklassen des Minimalstandards Tier 1 der nationalen THG-Berichterstattung ein zentrales Unterscheidungsmerkmal dar.

Neben der klimatischen Lage berücksichtigen alle THG-Erfassungsansätze den **Grundwasserflurabstand** als Einflussgröße auf die THG-Emissionen. Der durchschnittliche Grundwasserflurabstand fließt zentimetergenau in die modellbasierte THG-Erfassung der Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC sowie die deutsche THG-Berichterstattung ein. Bei MoorFutures und VCS kann er zur Verifizierung identifizierter Vegetationsformen genutzt werden. Falls keine Vegetation vorhanden ist, wird er zur direkten Ermittlung der THG-Emissionen herangezogen. Anstelle durchschnittlicher Grundwasserflurabstände werden bei

beiden Ansätzen Wasserstufen ermittelt (siehe Kapitel 2.2.2). Der Tier 1 Ansatz der nationalen THG-Berichterstattung unterscheidet zwischen flach und tief entwässerten Mooren. Als Grenze ist ein Grundwasserflurabstand von 30 cm im Jahresdurchschnitt festgelegt. Auch unter dem Moorland Projektstandard werden die Grundwasserflurabstände grob kategorisiert. Es wird zwischen nassen, feuchten und trockenen Landnutzungskategorien unterschieden. Konkrete Grenzwerte sind in diesem Fall nicht festgelegt.

Als dritter Parameter wird die **Landnutzung bzw. Vegetation** von allen Ansätzen berücksichtigt. In der THG-Berichterstattung sowie den Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC wird auf eine grobe Landnutzungskategorisierung zur Abschätzung der THG-Emissionen zurückgegriffen. Genauere Vegetationsunterschiede werden unter den Projektstandards MoorFutures, Moorland und VCS erfasst. Während die Projektgebiete von MoorFutures und VCS unter Bezugnahme auf die GESTs nach Couwenberg et al. (2008, 2011) kartiert werden, wird von Moorland auf die Biotoptypen nach von Drachenfels, (2021) zurückgegriffen. Im Gegensatz zu den im GEST Ansatz definierten Vegetationsformen wurde den einzelnen Biotoptypen kein Emissionsfaktor zugeordnet. Sie müssen Landnutzungskategorien zugeordnet werden. Dies reduziert das Ausdifferenzierungspotential der THG-Emissionen eines Standortes. Die GESTs wurden ursprünglich zur Klassifizierung von Grünlandstandorten und wiedervernässten bzw. naturnahen Mooren entwickelt (Couwenberg et al., 2008). Reichelt (2015) hat im Zuge einer Aktualisierung der GESTs zwei Emissionsklassen für die Landnutzungskategorie Ackerland ergänzt. Nun fehlen lediglich GESTs für Waldstandortorte sowie Emissionsfaktoren für unbedeckte Standorte. Diesbezügliche Informationen können bei VCS anderen begutachteten Veröffentlichungen entnommen werden.

Bodenparameter werden in den untersuchten Ansätzen nur in geringem Umfang zur Abschätzung von THG-Emissionen herangezogen. Die Torfmächtigkeit wird in allen Ansätzen zur Abgrenzung von Moorböden ermittelt und in den Projektstandards zur Bestimmung der Torferschöpfungszeit herangezogen. Nur bei PCC wird sie hingegen zur Abschätzung der jährlichen THG-Emissionen berücksichtigt. Sie dient hier der Ermittlung des effektiven Moorwasserstandes von Niedermooren (siehe Kapitel 2.2.2). Darüber hinaus berücksichtigt PCC ebenso wie Moorland den Moortyp (Niedermoor / Hochmoor) bei der Abschätzung von THG-Emissionen. Im Bereich der weiteren Bodeneigenschaften unterscheidet das IPCC (2014) zwischen nährstoffreichen und nährstoffarmen Böden. Ansonsten werden Bodenparameter lediglich indirekt über die Erfassung der Landnutzung bzw. Vegetation berücksichtigt.

Tabelle 7: THG-Erfassungsansätze: Erfasste Aktivitätsdaten zur Abschätzung von THG-Emissionen

THG-Erfassungsansatz	Klima- zone	Grund- wasserfl urabsta nd	Torf- mächtig- keit	Moor- typ	Weitere Boden- eigen- schaften	Land- nutzung	Vege- tations- / Biotop- typ
THG-Inventarbericht							
Minimalstandard (Tier 1) ¹		2 Klassen			Nährstoffe		

THG-Erfassungsansatz	Klima- zone	Grund- wasserflur- abstand	Torf- mächtig- keit	Moor- typ	Weitere Boden- eigen- schaften	Land- nutzung	Vegeta- tions- / Biotop- typ
Ausgestaltung Deutschland ²							
Moorklimaschutzprojekte							
MoorFutures ³							
Moorbenefits 2.0 ⁴			K.A.	K.A.	K.A.		
Moorland ⁵		3 Klassen					Aggregiert
Peatland Carbon Code ⁶		Niedermoor	Niedermoor				
Verified Carbon Standard ⁷				Falls keine GESTs verfügbar	Falls keine GESTs verfügbar	Falls keine GESTs verfügbar	
GHG Protocol							
GHG Protocol ⁸	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten	Großer Freiraum bei der Methodenwahl, keine Vorgaben bzgl. der zu inkludierenden Aktivitätsdaten

Farbskalierung: **Grün** = wird detailliert erfasst, **Gelb** = wird grob bzw. nur teilweise erfasst, **Rot** = wird nicht erfasst
 Quellen: (1) IPCC (2014), (2) Tiemeyer et al. (2020), (3) Couwenberg et al. (2008); MoorFutures (2017); Reichelt (2015), (4) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (5) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-a), (6) IUCN National Committee United Kingdom (2023b), (7) Verra (2017), (8) WRI & WBCSD (2022b, S.55ff.).

Die **Erfassung der Aktivitätsdaten** erfolgt in allen Ansätzen unter Rückgriff auf mehrere Quellen bzw. Methoden (Tabelle 8). Unter dem Tier 1 Minimalstandard der nationalen THG-Berichterstattung kann auf inter- und nationale Datensätze zurückgegriffen werden. In der deutschen THG-Berichterstattung wird sowohl die Moorbodenkulisse als auch die Landnutzung nationalen Datensätzen entnommen. Die Grundwasserflurabstände werden mittels eines statistischen Modells punktweise geschätzt.

Bei allen Moorklimaschutzprojektstandards erfolgt die Datenerfassung sowohl im Rahmen von Vor-Ort-Untersuchungen (Vegetation, Torfmächtigkeit, Grundwasserflurabstand) als auch unter Rückgriff auf nationale Datensätze (Moorbodenkulisse, Torfmächtigkeit). Eine Besonderheit stellt Moorland dar. Hier kann eine erste Bestimmung der Biotoptypen bundeslandspezifischen Biotopkartierungen entnommen werden.

Beim GHG Protocol hängt die Aktivitätsdatenerfassung von der Rückverfolgbarkeit bezogener Leistungen ab. Im Fall guter Rückverfolgbarkeit bzw. bei der Erfassung von Scope 1 Emissionen können prinzipiell Vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt werden. Die Berücksichtigung, zu welchem Anteil bezogene Leistungen auf Mooren erstellt wurden, stellt im Bereich der Scope 3 Emissionen bereits einen wesentlichen Fortschritt dar. Selbst der Rückgriff auf nationale oder internationale Datensätze erhöht die Genauigkeit der THG-Berichterstattung daher deutlich.

Tabelle 8: THG-Erfassungsansätze: Erfassung von Aktivitätsdaten

THG-Erfassungsansatz	Vor-Ort-Untersuchung	Modellbasierte Schätzung	Nationale Datensätze	Internationale Datensätze
THG-Inventarbericht				
Minimalstandard (Tier 1) ¹	Rot	Rot	Grün	Grün
Ausgestaltung Deutschland ²	Rot	Grün	Grün	Rot
Moorklimaschutzprojekte				
MoorFutures ³	Grün	Rot	Grün	Rot
Moorland ⁴	Grün	Rot	Grün	Rot
Peatland Carbon Code ⁵	Grün	Rot	Grün	Rot
Verified Carbon Standard ⁶	Grün	Rot	Grün	Rot
GHG Protocol				
GHG Protocol ⁷	Gelb	Gelb	Gelb	Gelb

Farbskalierung: Grün = wird verwendet, Gelb = kann verwendet werden, Rot = wird nicht verwendet

Quellen: (1) IPCC (2014), (2) Tiemeyer et al. (2020), (3) MoorFutures (2017), (4) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-a), (5) IUCN National Committee United Kingdom (2023b), (6) Verra (2017), (7) WRI & WBCSD (2022b, S.55ff.).

3.2.4 Abschätzung von Treibhausgasemissionen

Die Abschätzung der THG-Emissionen erfolgt in den untersuchten Ansätzen auf zwei Weisen. Der Tier 1 Minimalstandard der THG-Berichterstattung und die Projektstandards MoorFutures, Moorland, VCS und PCC (bei Hochmooren) unterteilen ein Untersuchungsgebiet auf Grundlage der erfassten Aktivitätsdaten in homogene Teilgebiete, denen jeweils ein Emissionsfaktor zugeschrieben wird (Kapitel 2.2.3, 2.3.1). In der deutschen THG-Berichterstattung und bei den Projektstandards Moorbenefits 2.0 und PCC (bei Niedermooren) wird die Emission einzelner Treibhausgase auf Grundlage von statistischen Modellen räumlich und zum Teil zeitlich explizit bestimmt (Kapitel 2.3.2). In allen Ansätzen sind die Netto-CO₂-Emissionen und die CH₄-Emissionen der Fläche abzuschätzen. Bei den CH₄-Emissionen aus Gräben, N₂O-Emissionen und DOC Austrägen gibt es im Bereich der Moorklimaschutzprojektstandards Unterschiede. In der nationalen und unternehmerischen THG-Berichterstattung sind auch diese Emissionen grundsätzlich mitzuberechnenden (Tabelle 9). Bezüglich der methodischen Genauigkeit macht das **GHG Protocol** nur dann Vorgaben, wenn auch THG-Einbindungen berichtet werden sollen (Tier 3 Ansatz). Ansonsten kann die methodische Genauigkeit unter Berücksichtigung der vorliegenden Informationen selbst gewählt werden.

In der **nationalen THG-Berichterstattung** sind unabhängig von der methodischen Genauigkeit die gesamten CH₄, N₂O und Netto-CO₂-Emissionen sowie DOC Austräge zu berichten, welche aus Mooren oder daran angrenzenden Gräben freigesetzt werden. Zur Erfüllung des Minimalstandards kann für jedes THG auf ein Set von Emissionsklassen mit einem Emissionsfaktor und einem 95 % Konfidenzintervall zur Abbildung der Unsicherheit zurückgegriffen werden (IPCC, 2014).

Die methodische Genauigkeit der THG-Emissionserfassung von Mooren für das **deutsche THG-Inventar** geht darüber deutlich hinaus. Sowohl die Netto-CO₂-Emissionen als auch die CH₄-Emissionen der Fläche werden räumlich explizit auf Grundlage von eigens für den

Inventarbericht entwickelten statistischen Modellen ermittelt (Tiemeyer et al., 2020). Bei CH₄ sind diese landnutzungskategorie-spezifisch. Das Modell zur Abschätzung der Netto-CO₂-Emissionen ist für alle Landnutzungskategorien mit Ausnahme der Kategorien Wald, verbuschtes Grünland und Hecken gleich. Für letztere müssen sowohl die Netto-CO₂- als auch die CH₄-Emissionen dem IPCC (2014) Wetlands Supplement entnommen werden (Tier 1). In den Modellen ist der mittlere Jahres-Grundwasserflurabstand die erklärende Variable. Dieser wird im Abstand von 5 Jahren modellbasiert geschätzt (siehe Kapitel 3.2.2 UBA, 2024c; S.554). Während die räumliche Explizitat bereits für die Einstufung des Ansatzes als Tier 3 Ansatz spricht, ist die zeitliche Verfügbarkeit von Grundwasserflurabständen noch relativ eingeschränkt. Im nationalen THG-Inventarbericht wird der Ansatz dennoch als Tier 3 Ansatz bezeichnet (UBA, 2024b). Die Abschätzung der N₂O-Emissionen basiert auf national entwickelten, landnutzungskategorie-spezifischen Emissionsfaktoren (Tier 2). Die CH₄-Emissionen aus Entwässerungsgräben werden ebenso wie die durchschnittlichen Kohlenstoffauswaschungen (DOC) mit den Emissionsfaktoren des IPCC (2014) bewertet (Tier 1). Die Grabenfläche wird allerdings nicht auf 5 % geschätzt, wie es vom IPCC (2014) für den Tier 1 Ansatz pauschal empfohlen wird, sie wird unter Rückgriff auf das ATKIS Basis DLM exakt berechnet.

Die Methodik des Projektstandards **Moorbenefits 2.0** weist starke Parallelen zu der deutschen THG-Berichterstattung auf. Sowohl die Netto-CO₂- als auch die CH₄-Emissionen werden auf Grundlage von im Rahmen des „KliMoBay“ Forschungsprojektes entwickelten statistischen Modellen abgeschätzt (Klatt et al., 2023). Als erklärende Variable beinhalten sie den durchschnittlichen Jahres-Grundwasserflurabstand. Die Modelle sind landnutzungskategorie-spezifisch. Im Gegensatz zur nationalen THG-Berichterstattung kann die Ermittlung von Wasserständen auf Projektebene regelmäßig im Rahmen von Vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt werden, was die zeitliche Explizitat erhöhet (Tier 3). Bei den Landnutzungskategorien Ackerland und naturnahe Moore konnte der Zusammenhang zwischen dem Grundwasserflurabstand und den THG-Emissionen nicht modelliert werden. Für diese Kategorien wurden daher aus dem zugrundeliegenden Datensatz feste Emissionsfaktoren abgeleitet (Tier 2). Dies wurde auch für die N₂O-Emissionen so gehandhabt (Tier 2). Die DOC Austräge werden bei der Abschätzung der THG-Emissionen nicht berücksichtigt. Dies wird mit einer schwachen Informationslage begründet. Außerdem führt eine Nichtberücksichtigung eher zu einer Unterschätzung der THG-Emissionsminderungen, da die Auswaschung von Kohlenstoff durch die Wiedervernässung tendenziell abnimmt. Letzteres wird auch in den übrigen Projektstandards als Begründung („konservative“ Betrachtung) für die teilweise Nichterfassung von DOC, CH₄-Emissionen aus Gräben und N₂O-Emissionen gegeben (Tabelle 9).

Auch die THG-Emissionserfassung nach **PCC** basiert auf statistischen Modellen, welche die Netto-CO₂- und CH₄-Emissionen in Abhängigkeit des Grundwasserflurabstandes abbilden (Evans et al., 2021, 2023). Im Gegensatz zu den von Tiemeyer et al. (2020) und Klatt et al. (2023) modellierten Gompertz-Funktionen mit einem asymptotischen Sättigungsbereich, modellieren Evans et al. (2021) eine lineare Funktion zur Abbildung des Zusammenhanges zwischen Netto-CO₂-Emissionen und Grundwasserflurabständen (im Bereich von 0 – 100 cm unter Flur). Den landnutzungskategorie-spezifischen Zusammenhang zwischen dem Grundwasserflurabstand und den CH₄-Emissionen bilden alle drei Forschungsgruppen in Exponentialfunktionen ab. Bei PCC werden statistische Modelle bisher nur zur Abschätzung der Niedermooremissionen verwendet (UK Centre for Ecology & Hydrology & The James Hutton Institute, 2023). Im Fall von Hochmooren ist auf ein landnutzungskategorie-spezifisches Set von Emissionsklassen zurückzugreifen (IUCN National Committee United Kingdom, 2023b). Die N₂O-Emissionen werden bei beiden Moortypen auf Grundlage landnutzungskategorie-spezifischer Emissionsfaktoren ermittelt. Für DOC und CH₄ Graben Emissionen existieren bereits

regionalisierte Emissionsfaktoren, sie wurden allerdings noch nicht in den PCC integriert (Evans et al., 2023).

Die Projektstandards **MoorFutures**, **Moorland** und **VCS** sind auf die Abschätzung der THG-Emissionen auf Grundlage der vorherrschenden Vegetation ausgerichtet. Jeder Vegetationsform (MoorFutures, VCS) und jeder Landnutzungskategorie (Moorland) sind auf regionalen Messungen basierende, feste Emissionsfaktoren zugeordnet (Tier 2). MoorFutures und VCS verweisen auf die jeweils aktuelle publizierte Fassung der GESTs nach Couwenberg et al. (2008, 2011). Moorland listet ein nach Drösler et al. (2013) gebildetes Set von Emissionsklassen auf. In allen drei Projektstandards sind die Netto-CO₂-Emissionen und die CH₄-Emissionen der Fläche abzuschätzen. Die N₂O-Emissionen werden nur bei Moorland mitberücksichtigt. Die CH₄-Emissionen aus Gräben werden bei MoorFutures in einer aktualisierten aber noch unveröffentlichten Fassung der GESTs gesondert bewertet. Bei VCS können die CH₄-Emissionen aus Gräben optional erfasst werden. Die von Moorland veröffentlichten Dokumente treffen diesbezüglich keine Aussage. Eine eigene Grabenkategorie gibt es nicht.

Die für die Abschätzung von THG-Emissionen zur Verfügung stehenden statistischen Modelle und Emissionsfaktoren sind fast immer nach Treibhausgasen differenziert. Lediglich Moorland und PCC (Hochmoor) stellen aggregierte THG-Emissionsfaktoren zur Verfügung, welche eine separate Betrachtung einzelner Treibhausgase verhindern.

Tabelle 9: THG-Erfassungsansätze: Methodische Genauigkeit und berücksichtigte Treibhausgase

THG-Erfassungsansatz	Netto-CO ₂ -Emissionen	DOC	CH ₄ Fläche	CH ₄ Gräben	N ₂ O
THG-Inventarbericht					
Minimalstandard (Tier 1) ¹	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1
Ausgestaltung Deutschland ²	Tier 1 / Tier 3	Tier 1	Tier 1 / Tier 3	Tier 1	Tier 2
Moorklimaschutzprojekte					
MoorFutures ³	Tier 2		Tier 2	Tier 2	
Moorbenefits 2.0 ⁴	Tier 2 / Tier 3		Tier 2 / Tier 3	K.A.	Tier 2
Moorland ⁵	Tier 2		Tier 2	K.A.	Tier 2
Peatland Carbon Code ⁶	Tier 2 / Tier 3		Tier 2 / Tier 3		Tier 2
Verified Carbon Standard ⁷	Tier 2		Tier 2	Optional	
GHG Protocol					
GHG Protocol ⁸	Tier 1 – Tier 3	Tier 1 – Tier 3	Tier 1 – Tier 3	Tier 1 – Tier 3	Tier 1 – Tier 3

Farbskalierung: Grün = wird berücksichtigt, Gelb = wird optional berücksichtigt, Rot = wird nicht berücksichtigt

Quellen: (1) IPCC (2014), (2) Tiemeyer et al. (2020), UBA (2024c), (3) Couwenberg et al. (2008), MoorFutures (2017), (4) Lemmer et al. (in Vorbereitung), (5) BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland (o. J.-a), (6) IUCN National Committee United Kingdom (2023b,c), (7) Verra (2017), (8) WRI & WBCSD (2022b).

Zur Ermittlung der Gesamtemissionen muss in allen Ansätzen die Fläche des Teilgebietes mit dem entsprechenden Emissionsfaktor (in t CO₂eq/ha*a) multipliziert werden. Bei Ansätzen, die auf Emissionsklassen basieren, ist die Anzahl von Teilgebieten mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren beschränkt. Bei den modellbasierten Ansätzen ist die Anzahl

unterscheidbarer Teilgebiete theoretisch unlimitiert. Die Höhe der THG-Emissionen kann an jedem Grundwasserflurabstandsmess- bzw. schätzpunkt anders sein.

Abschließend sei auf zwei Besonderheiten bei der Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren hingewiesen. Einige THG-Erfassungsansätze berücksichtigen die abweichende Höhe der THG-Emissionen unmittelbar nach der Wiedervernässung, andere gestatten unter bestimmten Voraussetzungen die Anrechnung von THG-Einbindungen auf die Gesamtemissionen.

Die **Übergangsphase kurz nach der Wiedervernässung** eines Moores kann durch erhöhte CH₄-Emissionen sowie zum Teil auch durch erhöhte Kohlenstoffbindungen gekennzeichnet sein (Evans et al., 2023). Bei MoorFutures müssen aus diesem Grund in den ersten 3 Jahren nach der Wiedervernässung 10 t CO₂eq/ha*a zum durch die GESTs' ausgewiesenen Emissionsfaktor hinzugerechnet werden. VCS schreibt vor, dass die THG-Emissionen in der Übergangsphase begutachteten Veröffentlichungen zu entnehmen sind. Es muss die Art und Intensität der Vornutzung, die Klimazone sowie der Nährstoffgehalt des Bodens berücksichtigt werden. PCC und Moorland schreiben keine pauschalen THG-Emissionsaufschläge vor. Sie verweisen in diesem Zusammenhang auf Risikoabschläge, welche zum Ausgleich von Abschätzungsunsicherheiten und zur Sicherstellung von Permanenz zu bilden sind (zu Risikoabschlägen siehe Von Unger et al., 2019, S.36f.).

Gemäß dem Tier 1 Minimalstandard der nationalen THG-Berichterstattung ist eine Berücksichtigung von Übergangsphasen nicht erforderlich. Dies kann unter anderem damit begründet werden, dass dafür eine zeitlich und räumlich explizite Erfassung des Grundwasserflurabstandes notwendig wäre, welche beispielsweise auch in der methodisch deutlich anspruchsvolleren deutschen THG-Berichterstattung bisher nicht realisiert werden kann.

Die „Land Sector and Removals Guidance“ des GHG Protocol macht zum Thema der Übergangsphasen keine Vorgaben. Anders ist dies im Zusammenhang mit der **Anrechenbarkeit von THG-Einbindungen**. THG-Einbindungen können in jedem Scope *separat* von den THG-Emissionen berichtet werden. Die Höhe der THG-Einbindungen muss aber auf Grundlage von Primärdaten unter Verwendung eines Tier 3 Ansatzes ermittelt werden. Dies ist nur möglich, wenn die von einem Unternehmen beanspruchten Flächen zumindest auf Ebene der Landnutzungseinheit identifizierbar sind (siehe Kapitel 3.2.2). Nachdem THG-Einbindungen berichtet wurden, muss fortlaufend überprüft werden, ob der Kohlenstoff weiterhin gebunden ist. Ist eine Überprüfung nicht mehr möglich oder wird der Kohlenstoff freigesetzt, muss die Freisetzung als „Reversal“ berichtet werden (WRI & WBCSD, 2022a).

Sollte ein Unternehmen auf beeinflussten Flächen Moorklimaschutzprojekte durchführen (lassen), kann es die auf diese Weise erzielten THG-Emissionsminderungen nur dann in seinem THG-Bericht ausweisen, wenn dafür keine THG-Zertifikate verkauft wurden (Doppelzählung). Im Gegensatz zu Moorklimaschutzprojekten wird die Emissionsminderung nicht in die Zukunft projiziert. Stattdessen wird im THG-Bericht die berichtete Menge an Landnutzungsemissionen entsprechend der tatsächlich erreichten THG-Emissionsminderung reduziert.

Auch im Bereich der nationalen THG-Berichterstattung können THG-Einbindungen prinzipiell erfasst werden. Die Tier 1 Emissionsfaktoren des IPCC (2014) weisen allerdings auch für die Emissionsklassen wiedervernässter Böden keine Netto-THG-Einbindungen aus. Die deutsche THG-Berichterstattung kann derzeit nicht zwischen wiedervernässten und natürlichen Mooren unterscheiden. Bei Grundwasserflurabständen von weniger als 0,1 m werden daher weder THG-Emissionen noch THG-Einbindungen berichtet.

In den Projektstandards dürfen THG-Einbindungen nur bei PCC berücksichtigt werden. Die übrigen Standards verweisen auf den Konservativitätsanspruch bei der Projektion von THG-Emissionsminderungen und verbieten aus diesem Grund die Projektion von THG-Einbindungen.

3.3 Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die methodischen Unterschiede verschiedener THG-Erfassungsansätze aufgezeigt und in Beziehung zu ihrem Zweck und geographischen wie temporalen Bezug gesetzt. Unterschiede finden sich nicht nur zwischen den drei THG-Erfassungsansätzen (nationale und unternehmerische THG-Berichterstattung, Moorklimaschutzprojekte), sondern auch innerhalb dieser Ansätze. Die Unterschiede liegen im Bereich der Definition von Moorböden, der Berücksichtigung von Aktivitätsdaten und deren Erfassung sowie in der darauf aufbauenden Abschätzung von THG-Emissionen. Im Folgenden werden einige dieser Unterschiede beleuchtet und die Anwendbarkeit einzelner Vorgehensweisen in anderen Ansätzen beurteilt.

Die drei übergeordneten THG-Erfassungsansätze unterscheiden sich in ihrem grundsätzlichen **methodischen Ansatz**. Sowohl Moorklimaschutzprojekte als auch das GHG Protocol basieren auf dem Grundsatz der Konservativität. Aufgrund des unterschiedlichen Zwecks beider Ansätze erfordert die konservative Abschätzung gegenwärtiger Emissionen jedoch ein entgegengesetztes Vorgehen. Moorklimaschutzprojekte zielen auf THG-Emissionsminderungen ab. Um sicherzustellen, dass die kommunizierten Minderungen tatsächlich erreicht werden / worden sind, müssen die Emissionen konservativ abgeschätzt werden. Die Emissionen im Referenzszenario sollen unterschätzt und die im Projektszenario überschätzt werden. In der Praxis wird somit immer mehr reduziert als kommuniziert. Unter dem GHG Protocol müssen es Unternehmen vermeiden, die durch sie verursachten (und berichteten) THG-Emissionen zu unterschätzen. Gegenwärtige THG-Emissionen sollten daher überschätzt werden. Vergleicht man die für die Gegenwart geschätzten THG-Emissionen beider Ansätze, liegen die tatsächlichen Emissionen zwischen den unterschätzten THG-Emissionen der Moorklimaschutzprojekte und den überschätzten THG-Emissionen des GHG Protocols. Dies ist der Punkt, welcher in der nationalen THG-Berichterstattung möglichst genau zu treffen ist. Das Ziel der nationalen THG-Berichterstattung ist es nämlich, eine möglichst realitätsnahe Abschätzung der THG-Emissionen durchzuführen („best estimate“). **Keiner der drei Ansätze kann folglich ohne Emissionsab- bzw. -aufschläge auf andere Ansätze übertragen werden.**

Zudem unterscheiden sich die Ansätze in ihren **Abschätzungsmethoden**. Emissionsklassen werden anhand von Ausprägungen von Aktivitätsdaten definiert und jeder Klasse wird je Treibhausgas ein individueller Emissionsfaktor zugeschrieben. Mit Ausnahme von MoorFutures und VCS gleicht dabei keine Klassifizierung der anderen. In den modellbasierten THG-Erfassungsansätzen liegen jedem Ansatz eigene statistische Modelle zugrunde. Beim Einsetzen gleicher Aktivitätsdaten (z. B. Wasserstände) kann es dadurch zu großen Unterschieden in den abgeschätzten THG-Emissionen kommen. Auch der Vergleich der von Unternehmen berichteten THG-Emissionen aus Mooren wird durch die großen methodischen Spielräume erschwert, die das GHG Protocol bei der Erfassung von Landnutzungsemissionen gewährt.

Unterschiede in den Ergebnissen verschiedener THG-Erfassungsansätze resultieren auch aus den jeweils berücksichtigten Flächen. Die in der nationalen THG-Berichterstattung geschätzten Mooremissionen hängen wesentlich von den **Moorbodendefinitionen** einzelner Länder ab. Große nationale Unterschiede erschweren die Vergleichbarkeit (Martin & Couwenberg, 2021). Dasselbe gilt für den Vergleich der in Moorklimaschutzprojekten geschätzten THG-Emissionen mit dem nationalen THG-Inventar. Moorklimaschutzprojekte lassen besonders flachgründige Moorböden bei der Berechnung der Emissionsreduktion konservativ außer Acht.

Es ist anzunehmen, dass nur ein Bruchteil der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland ihre THG-Emissionen nach dem GHG Protocol erfasst. Falls also auf Unternehmensebene THG-Emissionen aus Mooren in Deutschland erfasst werden, werden sie in Form von **Scope 3 Emissionen** von den verarbeitenden Unternehmen berichtet. Eine auf diesen Daten beruhende Analyse der insgesamt in Deutschland freigesetzten THG-Emissionen aus Mooren ist nicht möglich. Zum einen kann es zu Exporten von auf Moorböden produzierten Rohstoffen und Verarbeitung durch im Ausland ansässige Unternehmen kommen, ohne, dass deren Bilanzen Stoffströme aus Deutschland ausdrücklich ausweisen und sich dadurch die jeweiligen Emissionen zuordnen ließen. Zum anderen kann die Bilanzierung von Emissionen aus der Produktion eines Produkts innerhalb einer Wertschöpfungskette durch unterschiedliche Unternehmen mehrfach berichtet werden, wenn dieses Produkt mehrfach verarbeitet wird und jeder Akteur die THG-Emissionen seiner gesamten Wertschöpfungskette erfasst.

Auch in dem hypothetischen Fall, dass alle Moore eines Landes direkt von Unternehmen, die ihre THG-Emissionen unter dem GHG Protocol berichten, kontrolliert werden (Scope 1), wäre die Gesamtsumme der berichteten THG-Emissionen aus Mooren nicht mit der eines nationalen THG-Inventars vergleichbar. Dies liegt daran, dass Unternehmen ihre **Organisationsgrenzen** unterschiedlich definieren dürfen (Kapitel 3.1.3). Dadurch werden die THG-Emissionen einzelner Flächen doppelt, die anderer Flächen nicht berichtet (siehe Beispiel im Kapitel 4.3).

Die erläuterten Unterschiede zeigen, dass die verschiedenen THG-Erfassungsansätze nur schwer miteinander vergleichbar sind und in einem Ansatz ermittelte THG-Emissionen auch dann nicht ohne Anpassungen von einem anderen Ansatz übernommen werden können, wenn die THG-Emissionen derselben Fläche abgeschätzt werden. Nichtsdestotrotz haben die Ansätze individuelle Stärken, von denen andere Ansätze sowohl hinsichtlich der Abschätzungsgenauigkeit aber auch hinsichtlich der Effizienz der THG-Erfassung profitieren können.

Ein großes Potential besteht im **Austausch erhobener Aktivitätsdaten**. Grobe Ansätze wie die der nationalen THG-Berichterstattung können beispielsweise auf die in Moorklimaschutzprojekten gemessenen Grundwasserflurabstände oder Vegetationsformen zurückgreifen. Sie können diese entweder direkt in die Berechnung der THG-Emissionen einfließen lassen oder damit die Genauigkeit statistischer Modelle (siehe Kapitel 2.2.3, z. B. Bechtold et al., 2014) erhöhen bzw. überprüfen. Der verzögerten Berücksichtigung von Moorklimaschutzprojekten im nationalen THG-Inventar könnte auf diese Weise ebenfalls entgegengewirkt werden. Die Voraussetzung für einen solchen Datenaustausch ist eine für alle Akteure zugängliche Datenbank mit gesicherter Qualität (Klatt et al., 2023).

Der Aufwand von Vor-Ort-Untersuchungen kann in Moorklimaschutzprojekten reduziert werden, wenn die Genauigkeit von in der nationalen THG-Berichterstattung verwendeten Modellen weiter steigt und diese einen Teil der Messungen ersetzen. Dies ist insbesondere bei großen Projektgebieten vielversprechend.

Unter dem GHG Protocol berichtende Unternehmen können zumindest während des Aufbaus einer Berichterstattung für Landnutzungsemissionen auf Daten der nationalen THG-Berichterstattung zurückgreifen. Wenn bezogene Leistungen lediglich bis zum Herkunftsland zurückverfolgt werden können, ist das nationale THG-Inventar hilfreich, um den Anteil von Mooren an der insgesamt für die Erstellung eines Produktes in Frage kommenden Fläche zu bestimmen. Ist dieser Anteil bereits bekannt oder mithilfe des THG-Inventarberichtes ermittelt worden, können dem nationalen Inventarbericht auch die durchschnittlichen THG-Emissionen der zur Erstellung der bezogenen Leistungen genutzten Moorstandorte entnommen werden.

3.4 Zwischenfazit

Alle untersuchten THG-Erfassungsansätze verfügen über eine konsistente **THG-Erfassungsmethodik**, die sich am Zweck, der Größe eines Untersuchungsgebietes und den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Erfassung von Aktivitätsdaten orientiert. Die verschiedenen Ansätze verfolgen spezifische Zwecke, wie die nationale THG-Berichterstattung, die Reduktion von Treibhausgasen durch Moorklimaschutzprojekte oder die unternehmerische THG-Berichterstattung. Diese Zwecke bestimmen die jeweils angewandte Methodik, die je nach Ziel der Erfassung angepasst ist. Beispielsweise sind die nationalen Berichte auf eine möglichst genaue, umfassende Erfassung der THG-Emissionen ausgelegt, während Moorklimaschutzprojekte auf die Abschätzung der Emissionsminderungen gegenüber einem Referenzszenario fokussiert sind.

Je breiter ein Ansatz verwendet werden kann, desto mehr Gestaltungsspielraum wird im Zusammenhang mit der methodischen Herangehensweise gewährt. Nichtsdestotrotz werden in allen Ansätzen eine umfassende Dokumentation der angewendeten Erfassungsmethodik und eine transparente Berichterstattung der THG-Emissionen, THG-Emissionsminderungen und THG-Einbindungen vorausgesetzt. Insgesamt sind die angewandten Methodiken geeignet, ihre jeweiligen Ziele zu erreichen, bieten aber in einigen Bereichen Optimierungspotentiale, um noch präzisere oder breiter anwendbare Ergebnisse zu erzielen.

Die Unterschiede in den Erfassungsmethoden führen aufgrund ihrer Ausrichtung auf unterschiedliche Ziele zu unterschiedlichen Ergebnissen. In Moorklimaschutzprojekten werden die THG-Emissionen konservativ abgeschätzt, um sicherzustellen, dass die kommunizierten Emissionsminderungen tatsächlich erreicht werden, während das *GHG Protocol* darauf abzielt, die durch Unternehmen verursachten Emissionen nicht zu unterschätzen. Nationale Berichterstattungen versuchen hingegen, möglichst genaue „best estimates“ zu liefern.

Die Integration der Ergebnisse eines THG-Erfassungsansatzes in einen anderen Ansatz, etwa die Nutzung projektspezifischer THG-Minderungsdaten im nationalen THG-Inventar, ist nur bedingt möglich. Die verschiedenen Ansätze unterscheiden sich nicht nur in ihrer Methodik, sondern auch im Umgang mit Unsicherheiten und der Datenbasis. Daher können durch Unternehmen und projekt- oder maßnahmen-spezifisch erfasste Emissionsminderungen aus Mooren nicht unmittelbar die im nationalen THG-Inventar erfassten Daten ersetzen.

Eine Vereinheitlichung der international zur Anwendung kommenden **Moorbodendefinitionen** wäre für die nationale THG-Berichterstattung vorteilhaft. Sie würde die Vergleichbarkeit der von einzelnen Ländern berichteten THG-Emissionen aus Mooren ebenso erhöhen wie eine separate, aber dafür gebündelte Ausweisung der Mooremissionen. Zurzeit werden die CH₄ und CO₂-Emissionen im Landnutzungssektor berichtet und mit der Senkenleistung des Waldes verrechnet. Die N₂O-Emissionen aus Mooren werden im Landwirtschaftssektor berichtet.

International agierende Unternehmen würden von einer Vereinheitlichung der Moorbodendefinitionen ebenfalls profitieren, da sie auf deren Grundlage konsistenter über die von ihnen verantworteten THG-Emissionen aus Mooren berichten könnten. Das *GHG Protocol* benennt zwar die vom IPCC (2006) modifizierte FAO Definition organischer Böden als maßgebend für die unternehmerische THG-Berichterstattung, für diese Definition existieren jedoch nicht in allen Ländern Kartenwerke. Unternehmen müssen also entweder eigenständig ermitteln, welche Böden unter die Definition fallen oder auf anderweitige Definitionen zurückgreifen.

Zur Einschätzung der Flächeneignung wäre es in Moorklimaschutzprojekten hilfreich, wenn neben den minimalen Torfmächtigkeiten auch die Anforderungen an den minimalen Gehalt organischer Bodensubstanz als Anforderung formuliert würden.

Das IPCC (2006, 2014) lässt bei der Wahl von Aktivitätsdatensätzen im Bereich des Minimalstandards großen Entscheidungsspielraum. Da sich die **räumliche Auflösung** international verfügbarer Datensätze in den vergangenen Jahren stark erhöht hat, könnte die Formulierung konkreterer Empfehlungen hinsichtlich der räumlichen Auflösung verwendeter Datensätze in Erwägung gezogen werden.

Auch das GHG Protocol überlässt den berichterstattenden Unternehmen große Freiräume bei der Wahl der räumlichen Erfassungsgenauigkeit von THG-Emissionen aus Mooren. Dies ist im Bereich der Scope 3 Emissionen, in denen die Rückverfolgbarkeit beanspruchter Leistungen herausfordernd sein kann, nachvollziehbar. Eine Steigerung der Bemühungen zur Rückverfolgung beanspruchter Leistungen ist allerdings nicht nur vor dem Hintergrund einer exakteren THG-Berichterstattung, sondern auch vor dem Hintergrund der Einhaltung von Sozialstandards erstrebenswert und in Lieferkettengesetzen festgeschrieben. Zumindest im Fall, des Berichtens von THG-Einbindungen müssen die beanspruchten Flächen möglichst exakt zurückverfolgt werden können. Außerdem wird durch ein separates Ausweisen von THG-Einbindungen im unternehmerischen THG-Bericht sichergestellt, dass THG-Einbindungen nicht zur Verringerung der THG-Emissionsreduktionsbemühungen führen.

Bei der **Abschätzung von THG-Emissionen** können die nationale THG-Berichterstattung und die Moorklimaschutzprojektstandards wechselseitig voneinander profitieren. Bei niedrigen Grundwasserflurabständen kann die nationale THG-Berichterstattung auf die Erfahrungen der Moorklimaschutzprojektstandards hinsichtlich der vegetationsbasierten THG-Abschätzung zurückgreifen. Umgekehrt können die auf Emissionsklassen basierenden Projektstandards zur Abschätzung der THG-Emissionen von Moorstandorten mit hohen Grundwasserflurabständen von der Integration existierender statistischer Modelle profitieren.

4 Vergleich der Ansätze anhand einer Projektfläche

In Kapitel 3 werden die Unterschiede der THG-Erfassungsansätze auf theoretischer Ebene analysiert. In diesem Kapitel werden diese Unterschiede veranschaulicht, indem die THG-Erfassungsmethodik einzelner Ansätze exemplarisch zur Bestimmung der THG-Emissionen einer Projektfläche angewendet wird. Die beispielhafte Projektfläche orientiert sich am Ausgangszustand der MoorFutures Projektfläche „Polder Kieve“ in Mecklenburg-Vorpommern. Um die Komplexität des Beispiels zu reduzieren und die Anwendbarkeit aller Methoden zu gewährleisten, mussten Vereinfachungen vorgenommen und Annahmen getroffen werden. Die dargestellte Projektfläche weicht daher von der Situation im Polder Kieve ab. Gleichwohl könnte die Darstellung einem realen Mooregebiet entsprechen.

In einem ersten Schritt werden die THG-Erfassungsansätze der Moorklimaschutzprojekte und der nationalen THG-Berichterstattung miteinander verglichen. Aus dem Bereich der Moorklimaschutzprojekte wird die Erfassungsmethodik von MoorFutures und PCC angewendet. MoorFutures stellt ein Beispiel aus der Gruppe der THG-Erfassungsansätze dar, die die THG-Emissionen eines Mooregebietes auf Grundlage von Emissionsklassen quantifizieren. PCC repräsentiert die modellbasierten THG-Erfassungsansätze. PCC wurde zwar für die Anwendung in Großbritannien entwickelt, ist jedoch zum Zeitpunkt der Berichtsanzfertigung der einzige modellbasierte Projektstandard, für den Modellgleichungen verfügbar sind. Da die klimatischen Bedingungen Großbritanniens nicht substantiell von denen Norddeutschlands abweichen und der Vergleich der methodischen Herangehensweisen im Vordergrund steht, wird über das nicht passende Anwendungsgebiet hinweggesehen. Zur Veranschaulichung der Methoden der nationalen THG-Berichterstattung wird sowohl der deutsche Ansatz als auch der international anwendbare Minimalstandard (Tier 1) angewendet.

Das GHG Protocol gibt keine konkrete Methode zur Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren vor. Es wird deshalb erst in einem zweiten Schritt hinzugezogen, um zu veranschaulichen, welchen Einfluss die Möglichkeiten zur Definition von Organisationsgrenzen auf die THG-Berichterstattung haben.

4.1 Eigenschaften der Projektfläche

Bei der Projektfläche handelt es sich um ein in Norddeutschland liegendes Niedermoor mit einer durchschnittlichen Torfmächtigkeit von 2 m und eine Größe von 54,4 ha. Die Fläche wird von einem Fluss in zwei Teile geteilt und von einem Grabensystem durchzogen. Der Umfang des Grabensystems wird im Projektdokument (Schäfer, 2012) nicht genauer beziffert. Es wird angenommen, dass 2 % der Projektfläche von Gräben bedeckt werden.

Im Rahmen einer Vegetationskartierung wurden in der realen Projektfläche 14 Vegetationsformen bestimmt (Schäfer, 2012). Da sich einige davon demselben GEST zuordnen lassen und die GESTs die feinste Klassifizierung des vorliegenden Beispiels darstellen, werden in Tabelle 10 nur die sieben charakteristischsten Vegetationsformen stellvertretend für eine Gruppe von bis zu 3 Vegetationsformen ausgewiesen (Spalte 2).

Neben den Vegetationsformen werden auch die von Schäfer (2012) kartierten Wasserstufen angegeben. Da einige THG-Erfassungsansätze auf mittleren jährlichen Grundwasserflurabständen basieren, werden diese aus den von Couwenberg et al. (2008) in Anlehnung an Koska (2001) definierten Wasserstandsbereichen der einzelnen Wasserstufen abgeleitet. Sowohl für das Sommer- als auch für das Winterhalbjahr wird zunächst der maximal in einer Wasserstufe auftretende Wasserstandsmedian mit dem minimal auftretenden Wasserstandsmedian gemittelt. Die erhaltenen Mittelwerte werden im Anschluss erneut

gemittelt. Das Ergebnis entspricht dem angenommenen mittleren Grundwasserflurabstand über ein Jahr. In diesem Beispiel stehen negative Werte für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche. Für das deutsche THG-Inventar werden die Grundwasserflurabstände in der Realität punktgenau geschätzt. Hier wird angenommen, dass die Schätzung zu den gleichen mittleren Grundwasserflurabständen führen würde wie die dargestellte Ableitung aus den Wasserstufen.

Unter Berücksichtigung des Wasserstandes wird jeder Vegetationsform ein GEST der aktualisierten GEST-Klassifikation von Reichelt (2015) (Spalte 4), eine Landnutzungskategorie des PCC (Spalte 5) und eine ebensolche der nationalen THG-Berichterstattung (Spalte 6) zugeordnet. Da es sich bei der Projektfläche um ein Niedermoor handelt, wird bei Letzteren davon ausgegangen, dass es sich um nährstoffreiche Böden handelt. Gemäß IPCC (2014) gelten die Moore als tief entwässert, deren mittlerer Grundwasserflurabstand größer als 30 cm ist. Während die Vegetation bzw. Landnutzung bei MoorFutures und PCC im Rahmen von Vor-Ort Untersuchungen ermittelt wird, wird in der nationalen THG-Berichterstattung auf nationale bzw. internationale Datensätze zurückgegriffen.

Tabelle 10: Fiktive Beispielfläche: Vegetation und Landnutzung

Nr.	Vegetationskartierung ¹	Wasserstufe ² / Grundwasserflurabstand ³ (Jahresmittel in cm unter Flur)	MoorFutures ⁴	Peatland Carbon Code ⁵	THG-Inventarbericht ⁶
1	Kriechhahnenfuß-Rasenschmielen-Grünland	2+ / -59 cm	Mäßig feuchtes Moorgrünland	Grünland intensiv	Grünland, nährstoffreich, tief entwässert
2	Honiggras-Weidelgras-Grünland	3+/2+ / -45 cm	Feuchtes Moorgrünland	Grünland intensiv	Grünland, nährstoffreich, tief entwässert
3	Flutschwaden-Rasenschmielen-Grasland	3+ / -29 cm	Feuchtes Moorgrünland	Grünland extensiv	Grünland, nährstoffreich, flach entwässert
4	Seggen-Rohrglanzgras-Grünland	4+ / -13 cm	Sehr feuchte Wiesen, Hochst. u. Kleinseggenriede	Modifiziertes Niedermoor	Grünland, nährstoffreich, flach entwässert
5	Sumpf-Seggen-Ried	4+ / -13 cm	Sehr feuchte Großseggenriede	Modifiziertes Niedermoor	Grünland, nährstoffreich, flach entwässert
6	Nachtschatten-Schilf-Röhricht	4+ / -13 cm	Nasse Großröhrichte	Modifiziertes Niedermoor	Grünland, nährstoffreich, flach entwässert
7	Hohlzahn-Wasserschwaden-Röhricht	5+/4+ / -6 cm	Nasse Großröhrichte	Wiedervernässtes Niedermoor	Wiedervernässt, nährstoffreich

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) Schäfer (2012) (3) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (4) Aktualisierte GESTs nach Reichelt (2015), (5) Evans et al. (2023), (6) IPCC (2014).

4.2 Abschätzung von Treibhausgasemissionen der Projektfläche

Auf Grundlage, der in Kapitel 4.1 dargestellten Eigenschaften der Projektfläche lassen sich mit allen vier THG-Erfassungsansätzen die THG-Emissionen der nach Vegetationsform und Wasserstand unterschiedenen Teilflächen abschätzen. Hierfür werden die Teilflächen den auf Grundlage von THG-Messungen gebildeten Emissionsklassen der einzelnen Ansätze zugeordnet bzw. in die in gleicher Weise entwickelten statistischen Modelle eingesetzt. Zunächst wird die Abschätzung der THG-Emissionen (in t CO₂eq/ha*a) nach Treibhausgas differenziert dargestellt. Im Anschluss werden die Gesamtemissionen (in t CO₂eq/a) berechnet. Die Umrechnung der THG-Emissionen in CO₂-Äquivalente erfolgt mit den GWP₁₀₀ Faktoren des 5. Assessment Reports des IPCC (CH₄ = 28, N₂O = 265, Myhre et al., 2013).

Für die **Netto-CO₂-Emissionen** weisen sowohl MoorFutures als auch der Tier 1 Minimalstandard der nationalen THG-Berichterstattung feste Emissionsfaktoren aus. Jedem in Tabelle 10 notierten GEST bzw. jeder Landnutzungskategorie kann ein spezifischer Emissionsfaktor zugeordnet werden (Tabelle 11). Eine zentimetergenaue Berücksichtigung der Grundwasserflurabstände wie im PCC und der deutschen THG-Berichterstattung erfolgt nicht.

Zur Ermittlung der Netto-CO₂-Emissionen unter PCC muss der effektive Grundwasserflurabstand (WTDe) jeder Teilfläche in die nachfolgende lineare Gleichung nach Evans et al. (2023, S.15) eingesetzt werden:

$$\text{Netto CO}_2 \text{ Emissionen (in } \frac{t \text{ CO}_2}{\text{ha} \cdot \text{a}}) = 0,4917 * (-WTD_e) - 6,34$$

Der effektive Grundwasserflurabstand entspricht in diesem Beispiel immer dem mittleren Jahres-Grundwasserflurabstand, da die Torfmächtigkeit mit 2 m stets größer als der mittlere Grundwasserflurabstand ist. Für die deutsche THG-Berichterstattung muss der mittlere Jahres-Grundwasserflurabstand (WTD) in die von Tiemeyer et al. (2020, S.5) modellierte Gompertz-Funktion eingesetzt werden:

$$\text{Netto CO}_2 \text{ Emissionen (in } t \frac{\text{CO}_2}{\text{ha} \cdot \text{a}}) = -0,93 + 11 * e^{-7,52 * e^{12,97 * (\frac{WTD}{100})}} * \frac{44}{12}$$

Die Funktion wird nur bei mittleren Jahres-Grundwasserflurabständen von bis zu 10 cm unter Flur verwendet. Darüber wird pauschal von einer neutralen THG-Bilanz ausgegangen, da wiedervernässte Moore zurzeit noch nicht von natürlichen Mooren abgegrenzt werden können, sich die THG-Emissionen jedoch unterscheiden.

Tabelle 11: Fiktive Beispielfläche: Netto-CO₂-Emissionen

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwasser- flurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures ³	Peatland Carbon Code ⁴	THG- Inventarberic ht Minimal- standard ⁵	THG- Inventarbericht Deutschland ⁶
			EF (Tier 2) (t CO ₂ eq/ha*a)	RM (Tier 3) (t CO ₂ eq/ha*a)	EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)	RM (Tier 3) (t CO ₂ eq/ha*a)
1	2+ / -59 cm	8,2	31,4	22,5	22,4	36,8
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	19,4	15,8	22,4	36,0
3	3+ / -29 cm	24,3	19,4	7,8	13,2	30,3
4	4+ / -13 cm	10,1	12,6	-0,2	13,2	5,7
5	4+ / -13 cm	0,4	10,7	-0,2	13,2	5,7
6	4+ / -13 cm	4,0	0,2	-0,2	13,2	5,7
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	0,2	-3,3	2,0	0,0
Nach Fläche gewichteter Durchschnitt			18,2	8,7	15,6	25,0

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) Emissionsfaktoren (EF) nach Reichelt (2015), (4) statistisches Modell (RM) nach Evans et al. (2023) (5) EF nach IPCC (2014) (6) RM nach Tiemeyer et al. (2020).

Alle Ansätze gehen von einer Abnahme der **Netto-CO₂-Emissionen** von Teilfläche 1 bis 7 aus (Tabelle 11). Dies kann damit erklärt werden, dass alle Ansätze den Zusammenhang zwischen dem Grundwasserflurabstand und den Netto-CO₂-Emissionen gleich bewerten. Der Tier 1 Minimalstandard der THG-Berichterstattung unterteilt die Projektfläche lediglich in drei Landnutzungskategorien. Er kann die Variationen der durchschnittlichen THG-Emissionen daher weniger gut abbilden als MoorFutures und die modellbasierten Ansätze.

Der nach Fläche gewichtete Durchschnitt zeigt eine große Spannweite geschätzter Netto-CO₂-Emissionen. Die Emissionen werden nach der Methodik der deutschen THG-Berichterstattung am höchsten, nach PCC am niedrigsten eingeschätzt. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Verläufen der modellierten THG-Funktionen: Bei einem Grundwasserflurabstand von ca. 40 cm ist der Sättigungsbereich der von Tiemeyer et al. (2020) modellierten Gompertz-Funktion bereits erreicht. Die lineare Funktion nach Evans et al. (2021) steigt bis zu einem Grundwasserflurabstand von 100 cm konstant an und erreicht erst bei einem Grundwasserflurabstand von 90 cm das Emissionsniveau der Gompertz-Funktion. Mit dem unterschiedlichen Verlauf der Funktionen lässt sich auch erklären, warum die Emissionsfaktoren der deutschen THG-Berichterstattung bei den Teilflächen 1 und 2 nahezu gleich hoch sind, während sie sich bei PCC deutlich unterscheiden. Eine Wasserstandsanhhebung der Teilfläche 1 auf das Niveau der Teilfläche 2 würde in der deutschen THG-Berichterstattung nur zu einer geringen Verringerung der Netto-CO₂-Emissionen führen (0,8 t CO₂/ha*a). Anders verhält sich dies bei PCC. Hier würden sich die Netto-CO₂-Emissionen um knapp 7 t CO₂/ha*a verringern.

Die **DOC Austräge** werden nur in den Ansätzen der nationalen THG-Berichterstattung abgeschätzt. Sie werden jeweils mit dem Standardemissionsfaktor des IPCC bewertet (Tabelle

12). Dieser ist für alle entwässerungsbasierten Landnutzungskategorien der temperaten Klimazone gleich. Lediglich wiedervernässte Moore haben einen niedrigeren Faktor.

Tabelle 12: Fiktive Beispielfläche: DOC Austräge

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwasser- flurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures keine Erfassung	Peatland Carbon Code keine Erfassung	THG- Inventarbericht Minimal- standard ³ EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)	THG- Inventarbericht Deutschland ⁴ EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)
1	2+ / -59 cm	8,2	-	-	1,1	1,1
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	-	-	1,1	1,1
3	3+ / -29 cm	24,3	-	-	1,1	1,1
4	4+ / -13 cm	10,1	-	-	1,1	1,1
5	4+ / -13 cm	0,4	-	-	1,1	1,1
6	4+ / -13 cm	4,0	-	-	1,1	1,1
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	-	-	0,8	0,0
	Nach Fläche gewichteter Durchschnitt		-	-	1,1	1,1

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) IPCC (2014), (4) Tiemeyer et al. (2020) zitieren IPCC (2014).

Die **CH₄-Emissionen** der Fläche werden von allen Ansätzen abgeschätzt (Tabelle 13). Bei MoorFutures und dem Minimalstandard der THG-Berichterstattung wird auf die Emissionsfaktoren der jeweiligen Emissionsklassen zurückgegriffen. Eine zentimetergenaue Berücksichtigung der Grundwasserflurabstände erfolgt nicht.

Bei PCC und der deutschen THG-Berichterstattung werden die durchschnittlichen CH₄ - Emissionen der Fläche modellbasiert ermittelt. Anders als zur Abschätzung der Netto-CO₂- Emissionen sind die statistischen Modelle in diesem Fall landnutzungskategorie-spezifisch. PCC liegt die folgende Funktion zugrunde:

$$CH_4 \text{ Emissionen (in } \frac{t \text{ CO}_2\text{eq}}{\text{ha*a}}) = 445,3 * 0,5^{\frac{-WTD+5}{6,31}} * RCH_4 \text{ (nach Evans et al., 2023, S.21)}$$

Es wird der Grundwasserflurabstand im Jahresmittel (WTD) – nicht der effektive Grundwasserflurabstand – als erklärende Variable verwendet. RCH₄ ist der landnutzungskategorie-spezifische Faktor. Bei allen im Beispiel berücksichtigten Landnutzungskategorien beträgt er 1,53.

Die für die deutsche THG-Berichterstattung angewendete Funktion lautet:

$$CH_4 \text{ Emissionen (in } \frac{t \text{ CO}_2\text{eq}}{\text{ha*a}}) = CH_{4\text{min}} + c * e^{-d*WTD/100} \text{ (nach Tiemeyer et al., 2020, S.5)}$$

Die Parameter haben folgende Werte: Dauergrünland: CH_{4min} = 3,5, c = 17.055 und d = -42,3, wiedervernässte Böden: CH_{4min} = 1,3, c = 292 und d = -5,6.

Tabelle 13: Fiktive Beispielfläche: CH₄-Emissionen (Fläche)

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwasser- flurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures ³	Peatland Carbon Code ⁴	THG- Inventarbericht Minimal- standard ⁵	THG- Inventarbericht Deutschland ⁶
			EF (Tier 2) (t CO ₂ eq/ha*a)	RM (Tier 3) (t CO ₂ eq/ha*a)	EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)	RM (Tier 3) (t CO ₂ eq/ha*a)
1	2+ / -59 cm	8,2	0,0	0,02	0,4	0,1
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	0,0	0,1	0,4	0,1
3	3+ / -29 cm	24,3	0,0	0,5	1,1	0,1
4	4+ / -13 cm	10,1	0,3	2,8	1,1	2,5
5	4+ / -13 cm	0,4	1,6	2,8	1,1	2,5
6	4+ / -13 cm	4,0	6,5	2,8	1,1	2,5
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	6,5	5,5	6,0	0,0
Nach Fläche gewichteter Durchschnitt			0,6	1,0	1,0	0,7

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) Emissionsfaktoren (EF) nach Reichelt (2015), (4) statistisches Modell (RM) nach Evans et al. (2023), (5) IPCC (2014), (6) Tiemeyer et al. (2020).

Das von den CH₄-Emissionen ausgehende Erderwärmungspotential (in t CO₂eq/ha*a) wird von allen Ansätzen deutlich niedriger eingeschätzt als das von mäßig bis stark entwässerten Mooren ausgehende Treibhauspotential der Netto-CO₂-Emissionen. Die beiden modellbasierten Ansätze stimmen nahezu überein. Dies gilt auch für die Teilfläche 7, für die im Fall der deutschen THG-Berichterstattung auf Grund des Grundwasserflurabstandes von weniger als 10 cm zwar 0 t CO₂eq ausgewiesen werden (siehe oben), sich rechnerisch aber THG-Emissionen von 7,1 t CO₂eq/ha*a ergeben würden. Bei den Teilflächen 4 bis 6 rechnen MoorFutures mit großen Unterschieden im Bereich der CH₄-Emissionen, obwohl die Flächen den gleichen Grundwasserflurabstand aufweisen. Dies lässt das Potential der Emissionsabschätzung auf Grundlage von Vegetationsformen als Ergänzung zur primär wasserstands-basierten Abschätzung erkennen.

Die CH₄-Emissionen aus Gräben werden nur in der nationalen THG-Berichterstattung gesondert bewertet (Tabelle 14). Falls keine Informationen über die Grabenfläche vorliegen, wird in dem Tier 1 Minimalstandard in der gemäßigten Klimazone pauschal von einem Grabenanteil von 5 % ausgegangen. Die CH₄-Emissionen werden dann auf 5 % der Projektfläche mit den Emissionsfaktoren für Gräben bewertet. Die übrigen 95 % werden mit den CH₄-Emissionsfaktoren für die Fläche (Tabelle 13) bewertet. Die deutsche THG-Berichterstattung greift ebenfalls auf die Tier 1 Emissionsfaktoren des IPCC zurück. Da die Grabenfläche hier exakt ermittelt wird, wird im Beispiel nur 2 % der Projektfläche mit dem CH₄-Emissionsfaktor für Gräben bewertet. Die THG-Emissionen der Gräben sind etwa doppelt so hoch wie die Emissionen der umliegenden entwässerten Fläche.

Tabelle 14: Fiktive Beispielfläche: CH₄-Emissionen (Graben)

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwasserflurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures keine Erfassung gemäß (3)	Peatland Carbon Code keine Erfassung	THG-Inventarbericht Minimalstandard ⁴ EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)	THG-Inventarbericht Deutschland ⁵ EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)
1	2+ / -59 cm	8,2	-	-	32,6	32,6
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	-	-	32,6	32,6
3	3+ / -29 cm	24,3	-	-	14,8	14,8
4	4+ / -13 cm	10,1	-	-	14,8	14,8
5	4+ / -13 cm	0,4	-	-	14,8	14,8
6	4+ / -13 cm	4,0	-	-	14,8	14,8
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	-	-	0,0	0,0
Nach Fläche gewichteter Durchschnitt			-	-	19,5	19,5

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) MoorFutures (2017), (4) IPCC (2014), (5) Tiemeyer et al. (2020) zitieren IPCC (2014).

Die **N₂O-Emissionen** werden in allen beispielhaft vorgestellten Ansätzen mit Ausnahme von MoorFutures erfasst (Tabelle 15). Es handelt sich jeweils um landnutzungskategorie-spezifische Emissionsfaktoren. Im Deutschen Inventarbericht gibt es nur eine Landnutzungskategorie für Grünland, die N₂O-Emissionen werden daher auf allen Teilflächen gleich eingeschätzt.

Tabelle 15: Fiktive Beispielfläche: N₂O-Emissionen

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwasserflurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures keine Erfassung	Peatland Carbon Code ³ EF (Tier 2) (t CO ₂ eq/ha*a)	THG-Inventarbericht Minimalstandard ⁴ EF (Tier 1) (t CO ₂ eq/ha*a)	THG-Inventarbericht Deutschland ⁵ EF (Tier 2) (t CO ₂ eq/ha*a)
1	2+ / -59 cm	8,2	-	3,1	3,4	1,9
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	-	3,1	3,4	1,9
3	3+ / -29 cm	24,3	-	0,8	0,7	1,9
4	4+ / -13 cm	10,1	-	0,0	0,7	1,9
5	4+ / -13 cm	0,4	-	0,0	0,7	1,9
6	4+ / -13 cm	4,0	-	0,0	0,7	1,9
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	-	0,0	0,0	0,0
Nach Fläche gewichteter Durchschnitt			-	1,2	1,4	1,9

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) Emissionsfaktoren (EF) nach Evans et al. (2023), (4) IPCC (2014), (5) Tiemeyer et al. (2020).

Zur Ermittlung der **Gesamtemissionen der Projektfläche** müssen die berechneten bzw. zugeordneten Emissionsfaktoren (Tabelle 11-15) mit dem Flächenumfang der jeweiligen Teilfläche multipliziert und im Anschluss summiert werden. Tabelle 16 zeigt die auf diese Weise ermittelten Gesamtemissionen. Außerdem weist sie für jeden Ansatz den teilflächenspezifischen, kumulierten Emissionsfaktor aus. Der kumulierte Emissionsfaktor entspricht der Summe der einzelnen Emissionsfaktoren und spiegelt das Erderwärmungspotential je Hektar wider. Die Emissionsfaktoren für die CH₄-Emissionen der Fläche bzw. der Gräben fließen wie oben erläutert gewichtet in den kumulierten Emissionsfaktor ein.

Tabelle 16: Fiktive Beispielfläche: Gesamtemissionen

Nr.	Wasserstufe ¹ / Grundwassererflurabstand ² (Jahresmittel in cm unter Flur)	Fläche in ha ¹	MoorFutures Gesamtemissionen in t CO ₂ eq/a (Kumulierter Emissionsfaktor in t CO ₂ eq/ha*a) ³	Peatland Carbon Code Gesamtemissionen in t CO ₂ eq/a (Kumulierter Emissionsfaktor in t CO ₂ eq/ha*a) ³	THG-Inventarbericht Minimalstandard Gesamtemissionen in t CO ₂ eq/a (Kumulierter Emissionsfaktor in t CO ₂ eq/ha*a) ³	THG-Inventarbericht Deutschland Gesamtemissionen in t CO ₂ eq/a (Kumulierter Emissionsfaktor in t CO ₂ eq/ha*a) ³
1	2+ / -59 cm	8,2	257 (31,4)	210 (25,6)	238 (29,0)	333 (40,6)
2	3+/2+ / -45 cm	6,7	130 (19,4)	127 (18,9)	194 (29,0)	267 (39,8)
3	3+ / -29 cm	24,3	471 (19,4)	219 (9,0)	408 (16,8)	819 (33,7)
4	4+ / -13 cm	10,1	130 (12,9)	26 (2,6)	169 (16,8)	116 (11,5)
5	4+ / -13 cm	0,4	5 (12,3)	1 (2,6)	7 (16,8)	5 (11,5)
6	4+ / -13 cm	4,0	27 (6,7)	10 (2,6)	67 (16,8)	46 (11,5)
7	5+/4+ / -6 cm	0,7	5 (6,7)	2 (2,3)	6 (8,8)	0 (0,0)
Gesamt		54,4	1.026 (18,9)	596 (10,9)	1.089 (20,0)	1.586 (29,2)

Quellen: (1) Schäfer (2012), (2) eigene Berechnungen, negatives Vorzeichen steht für Wasserstände unterhalb der Bodenoberfläche, (3) angepasst nach Schäfer (2012) (4) Fläche*kumulierter Emissionsfaktor (EF); Kumulierter EF entspricht der Summe der EF der einzelnen THG, bei THG-Inventarbericht Minimalstandard fließt der EF CH₄ (Fläche) zu 95 % und der EF CH₄ (Graben) zu 5 % in die Gesamtsumme ein. Bei THG-Inventarbericht Deutschland fließt der EF CH₄ (Fläche) zu 98 % und der EF CH₄ (Graben) zu 2 % in die Gesamtsumme ein. Ausnahme bei beiden: Landnutzungskategorie „Wiedervernässt“ (Nr.7), dort keine separate Betrachtung der Grabenemissionen erforderlich.

Die mit den verschiedenen THG-Erfassungsansätzen ermittelten Gesamtemissionen variieren zwischen ca. 600 t CO₂eq/a und 1.600 t CO₂eq/a. Dies liegt vor allem an der unterschiedlichen Einschätzung der Netto-CO₂-Emissionen in den Ansätzen des PCC und der deutschen THG-Berichterstattung (siehe oben). Sehr ähnlich werden die Gesamtemissionen durch die Anwendung des Tier 1 Minimalstandards der nationalen THG-Berichterstattung und der Methode von MoorFutures eingeschätzt. Die leicht niedrigeren THG-Emissionen bei MoorFutures resultieren vor allem aus der konservativen Nicht-Erfassung der N₂O- und CH₄-Graben-Emissionen.

Bei diesem Vergleich handelt es sich lediglich um einen beispielhaften Ausschnitt. Die unterschiedlichen Ergebnisse können nicht verallgemeinert werden. Würde man einen tiefer entwässerten Grünlandstandort mit denselben Methoden bewerten, lägen die Schätzungen des PCC und der deutschen THG-Berichterstattung weniger weit auseinander. Die Schätzung des PCC würde sich aufgrund der in Abhängigkeit des Wasserstandes linear ansteigenden Netto-CO₂ Emissionsfunktion der Schätzung der deutschen THG-Berichterstattung annähern. Diese steigt sich bei Grundwasserflurabständen oberhalb von 40 cm nur noch unwesentlich.

4.3 Rolle von Organisationsgrenzen in der unternehmerischen Treibhausgasberichterstattung

Das folgende Beispiel veranschaulicht, warum die THG-Emissionen der Moore einer Region bzw. eines Landes auch dann nicht korrekt von den unternehmerischen THG-Berichten abgebildet werden, wenn alle Moore von nach dem GHG Protocol berichtenden Unternehmen direkt kontrolliert werden. Dies hängt mit den Möglichkeiten der Definition von Organisationsgrenzen zusammen. In Kapitel 3.1.2 wurden drei Ansätze zur Definition von Organisationsgrenzen erläutert. Auf den Ansatz der finanziellen Kontrolle sowie den Equity Share Ansatz wird im Folgenden Rechenbeispiel eingegangen. Die dargestellten Effekte könnten auch dann auftreten, wenn ein Unternehmen den Ansatz der operationellen Kontrolle verfolgt.

Folgende Situation sei gegeben: Alle Moore einer Region werden von einem Tochterunternehmen der THG-berichterstattenden Unternehmen A und B bewirtschaftet. Unternehmen A definiert seine Organisationsgrenzen nach dem Ansatz der finanziellen Kontrolle, Unternehmen B nach dem Equity Share Ansatz. Das Unternehmen B hat den größeren Anteil am Eigenkapital des Tochterunternehmens und damit die finanzielle Entscheidungshoheit. Unter diesen Umständen beruft sich Unternehmen A darauf, keine finanzielle Entscheidungshoheit über das Tochterunternehmen zu haben und berichtet daher keine THG-Emissionen. Unternehmen B berichtet nur den Anteil der aus Mooren stammenden THG-Emissionen, der seinem Anteil am gemeinsamen Tochterunternehmen entspricht. Die verbleibenden THG-Emissionen werden nicht berichtet (Tabelle 17, Situation I).

Tabelle 17: Unternehmerische THG-Berichterstattung: Equity Share Ansatz und Ansatz der Finanziellen Kontrolle

	Situation I Unternehmen A	Situation I Unternehmen B	Situation II Unternehmen A	Situation II Unternehmen B
Ansatz zur Abgrenzung von Organisationsgrenzen	Finanzielle Kontrolle	Equity Share Ansatz	Finanzielle Kontrolle	Equity Share Ansatz
Anteil am Tochterunternehmen	40 %	60 %	60 %	40 %
Tatsächliche THG-Emissionen	1.000 t CO ₂ eq/a	1.000 t CO ₂ eq/a	1.000 t CO ₂ eq/a	1.000 t CO ₂ eq/a
Berichtete THG-Emissionen	0 t CO ₂ eq/a	600 t CO ₂ eq/a	1.000 t CO ₂ eq/a	400 t CO ₂ eq/a
Summe berichtete THG-Emissionen	600 t CO ₂ eq/a	600 t CO ₂ eq/a	1.400 t CO ₂ eq/a	1.400 t CO ₂ eq/a

Quellen: Eigene Berechnungen nach Ranganathan et al., 2004).

Unter folgenden Umständen kann es auch dazu kommen, dass ein Teil der THG-Emissionen doppelt berichtet wird: Wenn Unternehmen A über die finanzielle Entscheidungshoheit im Tochterunternehmen verfügt, berichtet es 100 % der THG-Emissionen des Tochterunternehmens. Gleichzeitig berichtet Unternehmen B THG-Emissionen in Höhe seines Anteils am Eigenkapital des Tochterunternehmens (Tabelle 17, Situation II).

Eine regionale Erfassung der THG-Emissionen auf Grundlage der unternehmerischen THG-Berichterstattung wäre in diesem hypothetischen Beispiel nur dann möglich, wenn alle Unternehmen den gleichen Ansatz zur Definition von Organisationsgrenzen nutzen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine realitätsnahe Abschätzung der THG-Emissionen aus Mooren ist Grundlage für einen effektiven Klimaschutz

Eine möglichst exakte und flächendeckende Abschätzung der THG-Emissionen aus Mooren ist von entscheidender Bedeutung um eine möglichst präzise Überprüfung der Fortschritte in Bezug auf die Klimaschutzziele zu ermöglichen und die Entwicklung, Finanzierung und Überprüfung standortangepasster Moorschutzmaßnahmen gezielt zu unterstützen.

Unterschiedliche Definitionen von Moorböden führen zu unterschiedlichen Abschätzungen von THG-Emissionen und erschweren die Vergleichbarkeit zwischen Staaten, Unternehmen und Projekten.

Die Vergleichbarkeit der THG-Emissionen aus Mooren und der Effekte von Moorschutzmaßnahmen hängt maßgeblich von den zugrunde liegenden Definitionen ab. Unterschiedliche nationale und internationale Definitionen von Moorböden erschweren die Vergleichbarkeit der berichteten THG-Emissionen. Eine Harmonisierung dieser Definitionen würde die Transparenz und Vergleichbarkeit sowohl auf nationaler Ebene als auch in der Unternehmensberichterstattung verbessern.

Das Emissionsverhalten von Moorböden kann aus Aktivitätsdaten, wie z. B. Grundwasserflurabständen oder Landnutzungsformen, abgeleitet werden.

Aktuelle THG-Erfassungsansätze stützen sich auf den wissenschaftlich belegten Zusammenhang zwischen diesen Aktivitätsdaten und den Treibhausgasflüssen. Allerdings unterscheiden sich die Ansätze zur THG-Erfassung je nach Zielsetzung erheblich. Diese methodischen Unterschiede führen dazu, dass die geschätzten Emissionen zwischen den Ansätzen unterschiedlich sein können und nicht ohne Anpassungen übertragbar sind.

Moorklimaschutzprojekte unterschätzen die Emissionen in einem Referenzszenario tendenziell und überschätzen sie im Projektszenario um sicherzustellen, dass die erzielten Minderungen nicht überschätzt werden. Im Gegensatz dazu legt das GHG Protocol den Fokus darauf, die gegenwärtigen Emissionen eher zu überschätzen, um sicherzustellen, dass Unternehmen ihre Emissionen nicht zu gering ansetzen. Die nationalen Inventare, so auch das deutsche THG-Inventar, versuchen die Emissionen möglichst realitätsnah abzuschätzen.

Der Austausch von Aktivitätsdaten kann die Genauigkeit der Abschätzung von THG-Emissionen verbessern

Der Austausch und die Nutzung von Aktivitätsdaten, die beispielsweise in Moorklimaschutzprojekten erhoben werden, könnte eine wertvolle Grundlage zur Verbesserung der Genauigkeit in nationalen Inventaren oder unternehmerischen Berichten bieten. Gleichzeitig bestehen Unterschiede in den zugrundeliegenden Methoden, was bedeutet, dass selbst bei Verwendung derselben Aktivitätsdaten (z. B. Grundwasserflurabstand) unterschiedliche Emissionen geschätzt werden können. Auch hier erschwert die fehlende einheitliche Definition von Moorböden die Vergleichbarkeit von verschiedenen Berichterstattungsansätzen. Trotzdem könnten Ansätze voneinander profitieren, etwa durch die gemeinsame Nutzung von Aktivitätsdaten und die Weiterentwicklung von Modellen, die sowohl in großflächigen Projekten als auch in der nationalen THG-Berichterstattung Anwendung finden können.

Unterschiedliche Ansätze zur Quantifizierung von THG-Emissionen aus Mooren können zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Klimawirkung derselben Fläche führen.

Gegenwärtige THG-Erfassungsansätze greifen auf den wissenschaftlich belegten Zusammenhang zwischen THG-Flüssen und Aktivitätsdaten zurück. Einige der Ansätze leiten den Zusammenhang aus einer Vielzahl von Feldstudien individuell für ihre Ansprüche her. Andere nutzen internationale Metastudien. Die Methodik wird in allen Ansätzen wissenschaftlich robust begründet und entspricht dem jeweiligen Zweck. Unterschiede in den Moorbodendefinitionen, den berücksichtigten Aktivitätsdaten, deren Erfassungsgenauigkeit sowie in der darauf aufbauenden Abschätzung von THG-Emissionen führen allerdings zwangsläufig dazu, dass die verschiedenen THG-Erfassungsansätzen im gleichen Gebiet stark voneinander abweichende Ergebnisse erzielen. Somit können zum Beispiel die im Rahmen von Moorklimaschutzprojekten erzielten Klimaschutzerfolge nicht in der für das Projekt quantifizierten Höhe auf die nationalen Klimaziele angerechnet werden. Dies gilt ebenfalls für die auf Unternehmensebene erfassten THG-Emissionen und -Einbindungen. Voneinander profitieren können die Ansätze dennoch. Beispiele sind etwa der Austausch erhobener Aktivitätsdaten oder die Kombination entwickelter Methoden (z. B. Vegetationsformen als Indikator für den Moorzustand und statistische Modelle für intensiv genutzte, tief entwässerte Moore).

Der Detailgrad der verwendeten Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren variiert je nach Größe und Zielsetzung des jeweiligen Untersuchungsgebietes. Je größer das Untersuchungsgebiet ist, desto unspezifischer werden generell die verwendeten Aktivitätsdaten. Einige Staaten (z. B. Deutschland und Großbritannien) verbessern ihre Erfassungsmethoden jedoch kontinuierlich und nehmen so eine Vorreiterrolle in der internationalen Berichterstattung zu Mooremissionen ein.

Die Entwicklung der „Land Sector and Removals Guidance“ des GHG Protocol ist zu begrüßen. Sie findet aber kaum Anwendung und kann staatliches Handeln nicht ersetzen.

Mit der Entwicklung der „Land Sector and Removals Guidance“ des GHG Protocol gewinnt die Betrachtung von THG-Emissionen aus Mooren auch im Rahmen der unternehmerischen THG-Berichterstattung an Bedeutung. Dies ist aus der Perspektive des Klimaschutzes als Erfolg zu werten. Derzeit haben Unternehmen, die im wesentlichen Umfang drainierte Moore wirtschaftlich nutzen, allerdings kaum einen Anreiz, die Klimawirkung von Moorböden nach dem GHG Protocol zu berichten, weil dies ihre Treibhausgasbilanz verschlechtern würde.

Für die in Moorregionen ansässigen land- und forstwirtschaftlichen Betriebe besteht in der Anwendung der „Land Sector and Removals Guidance“ eine Herausforderung. Die verarbeitenden Unternehmen könnten ihre Einkaufsregion verlagern und so das Problem hoher Scope 3 Emissionen aus Mooren umgehen. Die Schaffung der Voraussetzungen für nasse Bewirtschaftungsmöglichkeiten („Paludikultur“) sowie die Umsetzung sind also nicht nur aufgrund von sich verschärfenden politischen Nutzungsrestriktionen wichtig für die wirtschaftliche Existenz land- und forstwirtschaftlicher Betriebe in moorreichen Regionen, sondern auch aufgrund des steigenden Drucks nachgelagerter Unternehmen auf die Reduktion von THG-Emissionen.

Der Zielkonflikt zwischen möglichst exakter Erfassung der THG-Emissionen aus Mooren und zügiger Emissionsreduktion erfordert pragmatisches Handeln.

Die Vernetzung von bei unterschiedlichen Quantifizierungsansätzen vorhandenen Aktivitätsdaten kann die Genauigkeit der Erfassung steigern. Die gewünschte Steigerung der Diversität und Genauigkeit berücksichtigter Aktivitätsdaten erfordert ein hohes Maß an

Kooperation zwischen Institutionen, die an unterschiedlichen THG-Erfassungsansätzen beteiligt sind. Außerdem müssen möglichst kostengünstige und gleichzeitig exakte Erfassungsmethoden weiterentwickelt werden. Vielversprechend sind insbesondere der datenbankbasierte Austausch von Echtzeitinformationen und die Weiterentwicklung von Fernerkundungstechnologien.

Die gesteigerte Beachtung von Mooren für den Klimaschutz hat die Anzahl von THG-Messungen in den vergangenen Jahren erhöht. Dies wird in absehbarer Zeit eine exaktere Bildung von Emissionsklassen und eine stärkere Vereinheitlichung von statistischen Modellen ermöglichen.

Die Quantifizierung der Klimawirkung von Mooren ist jedoch komplex und nicht ohne Unsicherheitsmargen möglich. Die inhärente Vernetzung der Prozesse, die sowohl Emissions- als auch Einbindungsmechanismen beeinflussen, erschwert eine exakte Erfassung der kombinierten Wirkung, sodass selbst auf Grundlage umfangreicher Messungen die THG-Flüsse nur näherungsweise abgebildet werden können. Das heißt aber nicht, dass die Quantifizierungen nicht wissenschaftlich belastbar sind. Vielmehr müssen Unsicherheitsmargen hingenommen und transparent kommuniziert werden.

Auf der einen Seite sollte also, wie oben beschrieben, in die Verbesserung der Abschätzung von THG-Emissionen aus Mooren investiert werden. Auf der anderen Seite ist es bereits Konsens, dass die THG-Emissionen aus entwässerten Mooren hoch sind und eine zügige Reduktion der Emissionen nur durch eine Wiedervernässung erzielt werden kann. Im politischen Handeln ist es daher möglich und wichtig, gleichzeitig sowohl die Voraussetzungen für eine zügige und weitgehende Wiedervernässung zu schaffen und diese einzuleiten, als auch die Methoden zur Abschätzung der THG-Emissionen aus Mooren weiterzuentwickeln.

6 Quellenverzeichnis

- AdV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland). (2018a). *ATKIS Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM)*. <https://www.adv-online.de/jcc/exteng/binarywriterservlet?imgUid=fc770ae7-900f-6eff-de43-50376a112976&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>
- AdV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland). (2018b). *Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens – ATKIS-Katalogwerke, ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM, Version 7.1 rc.1*. <https://www.adv-online.de/jcc/extdeu/nav/a63/binarywriterservlet%3FimgUid%3D9201016e-7efa-8461-e336-b6951fa2e0c9%26uBasVariant%3D11111111-1111-1111-1111-111111111111>
- Aslan-Sungur, G., Lee, X., Evrendilek, F., & Karakaya, N. (2016). Large interannual variability in net ecosystem carbon dioxide exchange of a disturbed temperate peatland. *Science of The Total Environment*, 554–555, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.153>
- Barthelmes, A., Abel, S., Barthelms, K. D., Couwenberg, J., Kaiser, M., Reichelt, F., Tanneberger, F., & Joosten, H. (2021). Evaluierung von Moor-Wiedervernässungen in Deutschland – Ergebnisse, Erfahrungen und Empfehlungen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 171, 121–148. <https://doi.org/10.19213/973171>
- Barthelmes, A., Tegetmeyer, C., Barthelms, K. D., Beer, F., Malpica, C., Tanneberger, F., Elshehawi, S., & de Waard, F. (2024). *The Global Peatland Database*. <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html>
- Baudoin, E., Benizri, E., & Guckert, A. (2003). Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(9), 1183–1192. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00179-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00179-2)
- Bechtold, M., Tiemeyer, B., Laggner, A., Leppelt, T., Frahm, E., & Belting, S. (2014). Large-scale regionalization of water table depth in peatlands optimized for greenhouse gas emission upscaling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3319–3339. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3319-2014>
- Becker, C. (2022). *Untersuchung des Wasserstands und der Torfmächtigkeit im Hochmoorgebiet Wildsee mithilfe der geoelektrischen Widerstandstomografie*. Karlsruhe Institute of Technology. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000144218>
- BfN (Bundesamt für Naturschutz). (o. J.). *Eingriffsregelung*. Abgerufen 20. März 2024, von <https://www.bfn.de/ingriffsregelung>
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) & BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (Hrsg.). (2021). *Handreichung zum Vollzug der Bundeskompensationsverordnung, November 2021*. <https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-11/Handreichung%20zur%20BKompV.pdf>
- Birr, F., & Luthardt, V. (2021). Bewirtschaftungsverfahren. In *Klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von Niedermoorböden* (S. 20–96). <https://doi.org/10.19217/skr616>
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz). (2022). *Nationale Moorschutzstrategie*. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_moorschutzstrategie_bf.pdf
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz). (2023). *Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz*. <https://www.bmu.de/publikation/aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz>
- BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland. (o. J.-a). *Moorland für Moor und Klima – Hinweise für Projektpartner für die Einrichtung neuer Moorland Klimamoore*. Abgerufen 17. April 2024, von

https://www.moor-land.de/fileadmin/Dateien/Downloads/bnds_moorland_Broschuere_Projektpartner_web.pdf

BUND Landesverband Niedersachsen e.V. Projektbüro Moorland. (o.J.-b). *Moorland für Moor und Klima – Leitfaden Basismonitoring für Klimamoore im Projekt Moorland*. Abgerufen 19. April 2024, von https://www.moor-land.de/fileadmin/Dateien/Downloads/bnds_moorland_Basismonitoring_web.pdf

Chithambo, L., Tauringana, V., Tingbani, I., & Achiro, L. (2022). Stakeholder pressure and greenhouses gas voluntary disclosures. *Business Strategy and the Environment*, 31(1), 159–172. <https://doi.org/10.1002/bse.2880>

Couwenberg, J., Augustin, J., Michaelis, D., Wichtmann, W., & Joosten, H. (2008). *Entwicklung von Grundsätzen für eine Bewertung von Niedermooren hinsichtlich ihrer Klimarelevanz*. <http://duene-greifswald.de/doc/gest.pdf>

Couwenberg, J., Dommain, R., & Joosten, H. (2010). Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. *Global Change Biology*, 16(6), 1715–1732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02016.x>

Couwenberg, J., & Fritz, C. (2012). *Towards developing IPCC methane ‘emission factors’ for peatlands (organic soils)*. http://mires-and-peat.net/modules/download_gallery/dlc.php?id=0E93A383

Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärtsch, S., Dubovik, D., Lishchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A., & Joosten, H. (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674(1), 67–89. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>

De Vleeschouwer, F., Chambers, F. M., & Swindles, G. T. (2010). *Coring and sub-sampling of peatlands for palaeoenvironmental research*. <http://mires-and-peat.net/pages/volumes/map07/map0701.php>

Directive (EU) 2022/2464. (o.J.). *Of the European Parliament and the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting*. Official Journal of the European Union L322, 16.12.2022. <http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj>

Drösler, M., Adelman, W., Augustin, J., Bergman, L., Beyer, C., Chojnicki, B., Förster, C., Freibauer, A., Giebels, M., Görlitz, S., Höper, H., Kantelhardt, J., Liebersbach, H., Hahn-Schöfl, M., Minke, M., Petschow, U., Pfadenhauer, J., Schaller, L., Schägner, P., Wehrhan, M. (2013). *Klimaschutz durch Moorschutz – Schlussbericht des Vorhabens „Klimaschutz—Moornutzungsstrategien“ 2006-2010*. <https://edocs.tib.eu/files/e01fb13/735500762.pdf>

Eckelmann, W., Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joosten, H., Kühn, D., Sabel, K.-J., & Traidl, R. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (5. Aufl.). Schweizerbart Science Publishers. <https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510959204>

Ellenberg, H., Leuschner, C., & Dierschke, H. (2010). *Vegetation Europas mit den Alpen* (6. Aufl.). Verlag Eugen Ulmer.

European Parliament & European Council. (2023a). *Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772*. Official Journal of the European Union L series. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj

European Parliament & European Council. (2023b). *Regulation (EU) 2023/839 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the reporting and compliance rules, and setting out the targets of the Member States for 2030, and Regulation (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review (Text with EEA relevance)*. European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/839/oj/eng>

- Evans, C., Artz, R., Burden, A., Clilverd, H., Freeman, B., Heinemeyer, A., Lindsay, R., Morrison, R., Potts, J., Reed, M., & Williamson, J. (2023). *Aligning the Peatland Code with the UK Peatland Inventory*. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534668/1/N534668CR.pdf>
- Evans, C., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P. J., Cooper, H. M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R. P., Helfter, C., Heppell, C. M., Holden, J., Jones, D. L., Kaduk, J., Morrison, R. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*, 593(7860), 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1998). *World reference base for soil resources* (No. 84; World Soil Resources Reports). <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/world-reference-base/en>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). *Worldwide Land Cover Mapping – ESA WorldCover 10m v100*. <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/worldwide-land-cover-mapping/resource/26f0ad05-0628-45dd-9e1b-e34f26f8ed3f>
- Freibauer, A., Rounsevell, M. D. A., Smith, P., & Verhagen, J. (2004). Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>
- Goebel, W. (1996). *Klassifikation überwiegend grundwasserbeeinflusster Vegetationstypen*. Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser.
- Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F., & Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature Communications*, 11(1), 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Harthan, R. O., Förster, H., Borkowski, K., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jansen, L. L., Jörß, W., Kasten, P., Lorek, C., Ludig, S., Matthes, F. C., Steinbach, R., Bei der Wieden, M., Wiegmann, K., Brugger, H., Vos, C. (2023). *Projektionsbericht 2023 für Deutschland: Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10(2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes* (3. Aufl.). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_12_23.pdf
- Hartmann, J., & Moeller, S. (2014). Chain liability in multitier supply chains? Responsibility attributions for unsustainable supplier behavior. *Journal of Operations Management*, 32(5), 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.01.005>
- Höper, H. (2007). *Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren*. https://www.researchgate.net/publication/279561926_Freisetzung_von_Treibhausgasen_aus_deutschen_Mooren_Greenhouse_gas_emissions_from_German_peatlands
- Inman, M. (2008). Carbon is forever. *Nature Climate Change*, 1, 156–158. <https://doi.org/10.1038/climate.2008.122>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (S. Egglestone, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Hrsg.). IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC. (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands* (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, & T. G. Troxler, Hrsg.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/>

- IUCN National Committee United Kingdom. (2023a). *Peatland Code – Field Protocol, Assessing eligibility, determining baseline condition category and monitoring change, Version 2.0*. https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/sites/default/files/2023-03/FieldProtocol_%20v2_clean_0.pdf
- IUCN National Committee United Kingdom. (2023b). *Peatland Code Emissions Calculator (Version 2, March 2023)*. https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/sites/default/files/header-images/PC_Bog%20Emissions%20Calculator_v2%20-%20locked.xlsx
- IUCN National Committee United Kingdom. (2023c). *Peatland Code Version 2.0*. https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/sites/default/files/2023-03/Peatland%20Code%20V2%20-%20FINAL%20-%20WEB_2.pdf
- Jeschke, L., & Joosten, H. (2003). Moore—Gefährdete Ökosysteme. In *Natur und Umwelt II: Klima, Pflanzen, Tierwelt* (S. 112–115). http://archiv.nationalatlas.de/wp-content/art_pdf/Band3_112-115_archiv.pdf
- JNCC, (Joint Nature Conservation Committee). (2011). *Towards an assessment of the state of UK Peatlands* (No. 445; JNCC report). <https://data.jncc.gov.uk/data/f944af76-ec1b-4c7f-9f62-e47f68cb1050/JNCC-Report-445-FINAL-WEB.pdf>
- Joosten, H., Couwenberg, J., Asbjørn, M., & Tanneberger, F. (2017). Mire and peatland terms and definitions in Europe. In H. Joosten, F. Tanneberger, & M. Asbjørn (Hrsg.), *Mires and peatlands of Europe* (S. 65–96). Schweizerbart Science Publishers. https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510653836/Joosten_Tanneberger_Moen_Mires_and_peat
- Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L., & Tol, S. (Hrsg.). (2012). *Peatlands – guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Wetlands International. <https://www.fao.org/4/an762e/an762e.pdf>
- Kasperzak, R., Kureljusic, M., Reisch, L., & Thies, S. (2023). Accounting for Carbon Emissions – Current State of Sustainability Reporting Practice under the GHG Protocol. *Sustainability*, 15(2), 994. <https://doi.org/10.3390/su15020994>
- Klatt, J., Schlaipfer, M., Meyer, H., Brehier, C., Friedrich, S., Gerner, A., Tarantik, M., Chiogna, G., Disse, M., Frischhut, M., Machl, T., Conze, N., Herr, M., Kotzi, J., Kühnel, A., Reif-Schneider, L., Welte, J., Kuhn, G., Freibauer, A., Drösler, M. (2023). *Abschlussbericht Klimaschutz- und Anpassungspotenziale in Mooren Bayerns (KliMoBay)*. Peatland Science Centre, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. <https://www.hswt.de/forschung/forschungsprofil/publikationen/detail/abschlussbericht-klimaschutz-und-anpassungspotenziale-in-mooren-bayerns-klimobay>
- Koska, I. (2001). *Ökohydrologische Kennzeichnung* (M. Succow & H. Joosten, Hrsg.; 2. Aufl.). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). <https://medienwelten.ekz.de/product?id=pim:65699f2ceabc8f1f0afba77a>
- Koska, I., Succow, M., & Clausnitzer, U. (2001). *Vegetation als Komponente landschaftsökologischer Naturraumkennzeichnung*. (M. Succow & H. Joosten, Hrsg.; 2. Aufl.). Schweizerbart Science Publishers. https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510651986/Landschaftsökologische_Moorkunde_Hrsg
- Kotowski, W., & van Diggelen, R. (1998). *Behaviour of wetland plant species along moisture gradient in two geographically distant areas*. https://www.researchgate.net/publication/236686942_Behaviour_of_wetland_plant_species_along_a_moisture_gradient_in_two_geographically_distant_areas

- Lemmer, M., Bodenmüller, D., Friedrich, S., Gutermuth, S., Papp, E., & Drösler, M. (in Vorbereitung). *moorbenefits 2.0 – Honorierungssystem für Klimaschutz auf organischen Böden in Bayern. Weiterentwicklung der moorbenefits für die Integration in die LENK. Abschlussbericht*. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- Leppelt, T., Dechow, R., Gebbert, S., Freibauer, A., Lohila, A., Augustin, J., Drösler, M., Fiedler, S., Glatzel, S., Höper, H., Järveoja, J., Lærke, P. E., Maljanen, M., Mander, Ü., Mäkiranta, P., Minkkinen, K., Ojanen, P., Regina, K., & Strömgen, M. (2014). Nitrous oxide emission budgets and land-use-driven hotspots for organic soils in Europe. *Biogeosciences*, 11(23), 6595–6612. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6595-2014>
- LfU Bayern, (Bayerisches Landesamt für Umwelt). (o. J.). *Biotopkartierung*. Abgerufen 20. März 2024, von <https://www.lfu.bayern.de/natur/biotopkartierung/index.htm>
- LfU Brandenburg, (Landesamt für Umwelt Brandenburg). (o. J.). *Brandenburger Biotopkartierung*. Abgerufen 20. März 2024, von <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/biotopschutz/biotopkartierung/#>
- Lindsay, R., Clough, J., Clutterbuck, B., Bain, C., & Goodyer, E. (2019). *Eyes on the Bog: Long-term monitoring network for UK peatlands*. International Union for the Conservation of Nature. <https://repository.uel.ac.uk/download/7da75fcfc6e6be900fff34c9ad36a7e981bcb98668d9716a359bd41cfe08d969/3463242/Eyes%20on%20the%20Bog%20Manual.pdf>
- Machnik, D., Tänzler, D., Schambil, K., Warnecke, C., Kachi, A., Götz, M., & Meierhofer, M. (2022). *Wie kompensiert Deutschland? Analyse der Potenziale für und Entwicklung von Anreizen zur freiwilligen Nutzung von Klimaschutzprojekten in Deutschland*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_52-2022_wie_kompensiert_deutschland_0.pdf
- Martin, N., & Couwenberg, J. (2021). *Organic Soils in National Inventory Submissions of EU Countries* (S. 86). Greifswald Mire Centre. https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021_Martin&Couwenberg.pdf
- Meier, E., Staubli, P., Müller, B. U., Stünzi, J., Schubert, E., & Dubois, D. (2002). Georadar – der zerstörungsfreie Blick in den Untergrund: Beispiele aus dem Naturschutzgebiet Zigermoos, Unterägeri/ZG und der Deponie Riet, Winterthur/ZH. *Bulletin für angewandte Geologie*, 7(1), 31–44. https://www.beckstaubli.ch/files/dokumente/moorregeneration/Georadar_Bull_angew_Geol_2002.pdf
- MoorFutures. (2017). *Methodologie für MoorFutures-Projekte*. https://www.moorfutures.de/app/download/31767996/Moorfutures_Methodologie.pdf
- Myhre, G., Shindell, F. M., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- Nielsen, C. K., Elsgaard, L., Jørgensen, U., & Lærke, P. E. (2023). Soil greenhouse gas emissions from drained and rewetted agricultural bare peat mesocosms are linked to geochemistry. *Science of The Total Environment*, 896, 165083. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165083>
- Nordt, A., Wichmann, S., Risse, J., Peters, J., & Schäfer, A. (2022). *Potenziale und Hemmnisse für Paludikultur. Hintergrundpapier zur Studie „Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050“*. Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt). https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/projektmechanismen/Hintergrundpapier-hemmnisse-paludikultur.pdf?__blob=publicationFile&v=2

- Pankaj Bhatia, Cynthia Cummis, David Rich, Laura Draucker, Holly Lahd, & Andrea Brown. (2011). *Greenhouse Gas Protocol – Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*.
https://files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/ghgp_corporate_value_chain_scope_3_standard.pdf
- Pankaj Bhatia, Cynthia Cummis, Laura Draucker, David Rich, Holly Lahd, & Andrea Brown. (2011). *Greenhouse Gas Protocol – Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. https://files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/ghgp_product_life_cycle_standard.pdf
- Pigaiani, C., & Batista e Silva, F. (2021). *The LUISA base map 2018 – a geospatial data fusion approach to increase the detail of European land use/land cover data*. Publications Office of the European Union.
<https://data.europa.eu/doi/10.2760/503006>
- Ranganathan, J., Corbier, L., Bhatia, P., Schmitz, S., Gage, P., & Oren, K. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised Edition*. https://files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/ghg_protocol_2004.pdf
- Rasper, M. (2004). Hinweise zur Berücksichtigung von Naturschutz und Landschaftspflege bei Grundwasserflurernahmen. *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen*, 4/2004, 199–230.
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/203613/Informationsdienst_Naturschutz_Niedersachsen_4_2004_Hinweise_zur_Beruecksichtigung_von_Naturschutz_und_Landschaftspflege_bei_Grundwasserentnahmen.pdf
- Reichelt, F. (2015). *Evaluierung des GEST-Modells zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Mooren [Masterarbeit]*. Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie.
- Reichelt, F. (2021). Treibhausgas-Emissionen aus organischen Böden in Brandenburg. *Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe*, 02/2021. https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-02_Reichelt.pdf
- Roßkopf, N., Fell, H., & Zeitz, J. (2015). Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *CATENA*, 133, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.004>
- SBT (Science Based Targets). (2023). *SBTi Monitoring Report 2022 – Looking back at 2022 and moving forward to 2023 and beyond*. <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTiMonitoringReport2022.pdf>
- SBT (Science Based Targets). (2024). *Target Dashboard (Beta)*. <https://sciencebasedtargets.org/target-dashboard#>
- Schäfer, A. (2012). *Projektdokument MoorFutures Polder Kieve (Mecklenburg-Vorpommern)*. https://www.moorfutures-mv.de/wp-content/uploads/sites/7/2023/11/Moorfutures_Polder-Kieve_Projektdokument-7.pdf
- Schäfer, A., Nordt, A., Peters, J., & Wichmann, S. (2022). *Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050*. *Climate Change* 44/2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_44-2022_entwickeln_von_anreizen_fuer_paludikultur_zur_umsetzung_der_klimaschutzziele_2030_und_2050.pdf
- Seuring, S., Müller, M., & Schwarzkopf, J. (2022). Nachhaltiges Management von Wertschöpfungsketten. In A. Baumast & J. Pape (Hrsg.), *Betriebliches Nachhaltigkeitsmanagement* (2. Aufl., S. 360–380). Verlag Eugen Ulmer.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., & Frank, S. (2020). Airborne Electromagnetic and Radiometric Peat Thickness Mapping of a Bog in Northwest Germany (Ahlen-Falkenberger Moor). *Remote Sensing*, 12(2), 203.
<https://doi.org/10.3390/rs12020203>
- Tanneberger, F., Tegetmeyer, C., Busse, S., Barthelmes, A., Shumka, S., Moles Mariné, A., Jenderidjian, K., Steiner, G. M., Essl, F., Etzold, J., Mendes, C., Kozulin, A., Frankard, P., Milanovic, D., Ganeva, A., Apostolova, I.,

- Alegro, A., Delipetrou, P., Navrátilová, J., Joosten, H. (2017). The peatland map of Europe. *Mires and Peat*, 19, 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>
- Tegetmeyer, C., Barthelms, K. D., Busse, S., & Barthelms, A. (2021). Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. *Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe*, 01/2021. https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf
- Thünen Earth Observation. (2023). *I spy with my little eye: Automated detection of agricultural parcels and crops using satellite images*. <https://www.thuenen.de/en/cross-institutional-projects/i-spy-with-my-little-eye-automated-detection-of-agricultural-parcels-and-crops-using-satellite-images>
- Tiemeyer, B. (2024). *Persönliche Kommunikation via E-Mail*. 03.04.2024.
- Tiemeyer, B., Albiac Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Drösler, M., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Freibauer, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Leiber-Sauheitl, K., Zeitz, J. (2016). High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, 22(12), 4134–4149. <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>
- Tiemeyer, B., Bechtold, M., Belting, S., Freibauer, A., Förster, C., Schubert, E., Dettmann, U., Frank, S., Fuchs, D., Gelbrecht, J., Jeuther, B., Laggner, A., Rosinski, E., Leiber-Sauheitl, K., Sachtleben, J., Zak, D., & Drösler, M. (2017). *Moorschutz in Deutschland – Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen: Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren*. Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr462>
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
- Turetsky, M. R., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N. B., Crill, P., Hornibrook, E. R. C., Minkinen, K., Moore, T. R., Myers-Smith, I. H., Nykänen, H., Olefeldt, D., Rinne, J., Saarnio, S., Shurpali, N., Tuittila, E., Waddington, J. M., White, J. R., Wickland, K. P., & Wilking, M. (2014). A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, 20(7), 2183–2197. <https://doi.org/10.1111/gcb.12580>
- UBA (Umweltbundesamt). (2024a). *Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>
- UBA (Umweltbundesamt). (2024b, Januar 30). *Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC)*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/klimarahmenkonvention-der-vereinten-nationen-unfccc#entstehungsgeschichte>
- UBA (Umweltbundesamt). (2024c, April 15). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2024—National Inventory Document for the German Greenhouse Gas Inventory 1990—2022*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2024-04-15_DE_NID_2024_UNFCCC_english.pdf
- UK Centre for Ecology & Hydrology, & The James Hutton Institute. (2023). *UK (Fen) Peatland Carbon Calculator v2*. https://www.iucn-uk-peatlandprogramme.org/sites/default/files/header-images/PC_Fen%20Emission%20Calculator_v2%20-%20Locked_0.xlsx
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2022). *Global Peatland Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report*. <https://www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022>

- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (o.J.). *Paris Agreement – Status of Ratification*. Abgerufen 17. April 2024, von <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2023). *National Inventory Submissions 2023*. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2024). *Biennial Transparency Reports*. <https://unfccc.int/biennial-transparency-reports>
- United Nations. (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). https://treaties.un.org/pages/viewdetails.aspx?src=treaty&mtdsg_no=xxvii-7-a&chapter=27&clang=_en
- United Nations. (2015). *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/paris-climate-change-conference-november-2015/paris-agreement>
- Vernimmen, R., Hooijer, A., Joosten, H., Ballhorn, U., Nuutinen, M., & Tata, H. (2020). Peatland mapping. In (Food and Agriculture Organization of the United Nations) FAO (Hrsg.), *Peatland mapping and monitoring: Recommendations and technical overview* (S. 8–18). <https://doi.org/10.4060/ca8200en>
- Verra. (2017). *VM0036 Methodology for Rewetting Drained Temperate Peatlands, Version 1.0, 17. July 2017, Sectoral Scope 14*. <https://verra.org/wp-content/uploads/imported/methodologies/VM0036-Rewetting-Drained-Temperate-Peatlands-v1.0.pdf>
- Verra. (2023). *Verified Carbon Standard: Program Definitions, 29. August 2023, v4.4*. <https://verra.org/wp-content/uploads/2023/08/VCS-Program-Definitions-v4.4.pdf>
- Verra. (2024). *Revision to VM0036 – Methodology for Rewetting Drained Temperate and Boreal Peatlands, v1.0*. <https://verra.org/methodologies/revision-to-vm0036-methodology-for-rewetting-drained-temperate-and-boreal-peatlands-v1-0/>
- von Drachenfels, O. (2021). *Kartierschlüssel für Biotoptypen in Niedersachsen unter besonderer Berücksichtigung der gesetzlich geschützten Biotope sowie der Lebensraumtypen von Anhang I der FFH-Richtlinie*. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/153183/Kartierschluesel_-_Stand_Juli_2016_-_Nicht_mehr_gueltig.pdf
- von Unger, M., Emmer, I., Joosten, H., & Couwenberg, J. (2019). *Designing an International Peatland Carbon Standard: Criteria, Best Practices and Opportunities, Final Report* (No. 42/2019; Climate Change). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-28_cc-42-2019_sca_peatland_standards_0.pdf
- von Unger, M., Tonneijck, F. H., & Soto, C. (2022). *Voluntary Carbon Markets for Wetland Conservation and Restoration*. Wetlands International. <https://www.wetlands.org/download/5519/?tmstv=1708509304>
- Wilson, D., Blain, D., & Couwenberg, J. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, 17(4), 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- Wittnebel, M., Frank, S., & Tiemeyer, B. (2023). *Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland* (No. 212; Thünen Working Paper). https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066305.pdf
- WRI (World Resources Institute), & WBCSD, (World Business Council for Sustainable Development). (2014). *Greenhouse Gas Protocol – GHG Protocol Agricultural Guidance*.

https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG%20Protocol%20Agricultural%20Guidance%20%28April%2026%29_0.pdf

WRI (World Resources Institute), & WBCSD, (World Business Council for Sustainable Development). (2022a). *Greenhouse Gas Protocol – Land Sector and Removals Guidance Part 1, Accounting and Reporting Requirements and Guidance, Supplement to the GHG Protocol Corporate Standard and Scope 3 Standard, Draft for Pilot Testing and Review*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Land-Sector-and-Removals-Guidance-Pilot-Testing-and-Review-Draft-Part-1.pdf>

WRI (World Resources Institute), & WBCSD, (World Business Council for Sustainable Development). (2022b). *Greenhouse Gas Protocol – Land Sector and Removals Guidance Part 2, Calculation Guidance, Supplement to the GHG Protocol Corporate Standard and Scope 3 Standard, Draft for Pilot Testing and Review*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Land-Sector-and-Removals-Guidance-Pilot-Testing-and-Review-Draft-Part-2.pdf>