

# ELaN Discussion Paper

Themenbereich  
Landnutzung

Teilprojekt  
„Nachhaltige  
Moornutzung“

TP 05

Björn Kluge  
Moritz Werkenthin  
Gerd Wessolek

*GIS Bearbeitung:*  
Albrecht Richter

## Regionalisierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Niedermooren

November 2013

ISBN 978-3-943679-11-3



Entwicklung eines  
integrierten Landmanagements  
durch nachhaltige Wasser- und  
Stoffnutzung in Nordostdeutschland

 NACHHALTIGES  
LANDMANAGEMENT

GEFÖRDERT VON  
 Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

 FONA  
Forschung für nachhaltige  
Entwicklungen  
BMBF



## Erschienene ELaN Discussion Paper

Die ELaN Discussion Paper werden vom Institut für Landschaftswasserhaushalt, ZALF-Müncheberg e.V. herausgegeben und sind als pdf-Datei abrufbar unter [www.elan-bb.de](http://www.elan-bb.de).

**Naumann & Moss:** Neukonfiguration regionaler Infrastrukturen - Chancen und Risiken neuer Kopplungen zwischen Energie- und Abwasserinfrastruktursystemen (Mai 2012) ISBN 978-3-943679-00-7 (geb.), ISBN 978-3-943679-01-4 (pdf)

**Kröger, Rückert-John & Schäfer:** Wissensintegration im nachhaltigen Landmanagement. Inter- und transdisziplinäre Problembeschreibung im Projektverbund ELaN. (Juli 2012) ISBN 978-3-943679-04-5 (geb.); ISBN 978-3-943679-05-2 (pdf)

**Nölting & Daedlow:** Einblick in die Akteurslandschaft zum Wasser- und Landmanagement in Brandenburg und Berlin - Am Beispiel der Stoffströme „geklärten Abwassers“ und „Magnesium-Ammonium-Phosphat-Dünger“ (August 2012) ISBN 978-3-943679-02-1 (geb.); ISBN 978-3-943679-03-8 (pdf)

**Artner-Nehls & Siebert:** Akteurinnen und Akteure, Akzeptanz und Konfliktpotenziale im nachhaltigen Land- und Wassermanagement im Rahmen von ELaN. (April 2013) ISBN 978-3-943679-08-3 (geb.); ISBN 978-3-943679-09-0 (pdf).

**Nägel & Steinhardt:** Zum Stand der Regionalplanung im Land Brandenburg - Möglichkeiten und Grenzen zur Steuerung nachhaltiger Landnutzung. (August 2013) ISBN 978-3-943679-06-9 (geb.); ISBN 978-3-943679-07-6 (pdf).

# Impressum

## Autoren

Dr. Björn Kluge  
Dipl.-Ing. Moritz Werkenthin  
Prof. Dr. Gerd Wessolek

## GIS Bearbeitung

M.Sc. Albrecht Richter

Institut für Ökologie  
FG Standortkunde & Bodenschutz  
Technische Universität Berlin  
Ernst-Reuter Platz 1  
10587 Berlin  
[www.boden.tu-berlin.de](http://www.boden.tu-berlin.de)

## Herausgeber

Leibniz-Zentrum für  
Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.  
Institut für Landschaftswasserhaushalt  
Eberswalder Straße 84  
15374 Müncheberg  
[www.elan-bb.de](http://www.elan-bb.de)  
[www.zalf.de](http://www.zalf.de)

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten im Verbundvorhaben **ELaN – Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland.**

## Redaktion

ELaN - Koordinatoren Team

- Dr. Petra Koepe (ZALF)
- Prof. Dr. Gunnar Lischeid (ZALF)
- Dr. Sebastian Maaßen (ZALF)
- Dr. Timothy Moss (IRS)
- Dr. Benjamin Nölting (TUB, HNEE)
- Prof. Dr. Dr. Martina Schäfer (TUB)
- Prof. Dr. Uta Steinhardt (HNEE)

## Copyright

Der Text, die Fotos und grafischen Gestaltungen sind urheberrechtlich geschützt.

Sollten Sie Teile hiervon verwenden wollen, wenden Sie sich bitte an den/die Autor/en.

Für die inhaltliche Darstellung des Themas, sind ausschließlich die Autor(Inn)en dieses Artikels verantwortlich.

ISBN 978-3-943679-10-6 (gebunden)

ISBN 978-3-943679-11-3 (pdf)

## Der ELaN-Forschungsverbund

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.



Freie Universität Berlin (FUB)



Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e.V. (Biopos)



Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH)



Technische Universität Berlin (TUB)



Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) e.V.



Leibniz-Institut für Regionentwicklung und Strukturplanung (IRS) e.V.



Humboldt Universität zu Berlin (HUB)



ECT Oekotoxikologie GmbH



Berliner Wasserbetriebe (BWB)



Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)



Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)



## Förderung

ELaN ist eines der Verbundvorhaben, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Entwicklung und Umsetzung innovativer Systemlösungen für ein nachhaltiges Landmanagement im Modul B (NLM) gefördert werden. Diese Fördermaßnahme ist Bestandteil des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklung“ (FONA).

**Förderkennzeichen 033L025A-L**

Projektlaufzeit: 2011 – 2015

[www.elan-bb.de](http://www.elan-bb.de)

## Vorwort zum ELaN-Projekt

Angangspunkt für das Verbundprojekt „Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland“ – ELaN – ist die bisherige Praxis, gereinigtes Abwasser über Oberflächengewässer abzuleiten, womit es der Landschaft verloren geht. Die These des Verbundprojektes ELaN ist, dass gereinigtes Abwasser zu einem nachhaltigen Wasser- und Landmanagement beitragen kann, indem ein zusätzlicher, kostengünstiger Reinigungseffekt erzielt und der regionale Wasserhaushalt an kritischen Stellen punktuell stabilisiert wird und so wertvolle Feuchtgebiete stützt.

Auf den vernässten Flächen ist es möglich, Biomasse zur stofflichen und energetischen Verwertung zu produzieren. Aus den Nährstoffen im Abwasser kann Dünger hergestellt oder aber das nährstoffhaltige geklärte Abwasser direkt wieder der Landwirtschaft zur Verfügung gestellt werden. Dabei verwendet ELaN modernste chemische Analytik und ökotoxikologische Wirkungstests für eine fundierte Erfassung des Risikos für die Qualität des Grundwassers und der Böden.

Für ein nachhaltiges Landmanagement, das an die Nutzung von gereinigtem Abwasser anknüpft, werden Möglichkeiten sondiert und analysiert. Diese innovativen Ansätze für ein nachhaltiges Landmanagement werden sozioökonomisch so ausgestaltet, dass sie Eingang in die Praxis der Akteure – von Genehmigungsbehörden über Landnutzer bis hin zu Konsumenten und zum Naturschutz – finden.

Da es sich um eine komplexe Innovation handelt, ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen und Sichtweisen notwendig. Es werden Untersuchungen zu den Themenbereichen 1) Wasser- und Stoffströme, 2) Landnutzung und 3) sozioökonomische Steuerung durchgeführt. Die Erkenntnisse werden mittels Methoden 4) der Wissensintegration zu praxistauglichen Lösungen verknüpft und in zwei Modellregionen erprobt. Diese Modelllösungen werden zu einer übergreifenden Systemlösung für die gesamte Untersuchungsregion Berlin-Barnim-Uckermark verdichtet und zu Strategien weiterentwickelt, die auf Gebiete mit vergleichbaren Herausforderungen übertragbar sind.

Ziel des Verbundvorhabens ELaN ist technologische Innovationen im Bereich Wasser- und Nährstoffmanagement mit organisatorischen Innovationen für ein nachhaltiges Landmanagement zu koppeln. Dies umfasst die Klärung der politisch-rechtlichen Voraussetzungen für die Ausbringung von gereinigtem Abwasser ebenso wie Aspekte der Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten.



**Jörg Haberland, John Sturgeon – moor - battery**

*Fotos: Helmut Kunde*

*Moore haben ihre Geschichte und wir versuchen sie zu verstehen...*

*Folgender Forschungsbericht beschreibt für Niedermoore, wie aus Kohlenstoffsinken -  
quellen werden können, wenn wir Menschen sie für die landwirtschaftliche Nutzung  
entwässern. Er zeigt aber auch Lösungswege auf, um diese Stoffverluste zu mindern.  
Damit versuchen wir einen Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung zu leisten.*

## Abstract

Objectives of the subproject 5 „Sustainable use of peatlands“ of the ELaN Research Network are to develop site-specific strategies for sustainable agricultural management options. For this purpose, a web-based decision-making and support system (DSS) „Sustainable use of peatlands“ is being developed at the Humboldt University Berlin (Prof. Dr. Zeitz), University for Sustainable Development Eberswalde (Prof. Dr. Luthardt) and Technical University Berlin (Prof. Dr. Wessolek) to provide recommendations for a sustainable use. An important subset of this DSS is the determination and regionalization of CO<sub>2</sub> emissions from peat soils under different land uses.

The aim of this study therefore was to determine the CO<sub>2</sub> release of typical peat land soils in the region of Berlin and Brandenburg under different land use conditions. In addition, land use scenarios for the next decade were predicted. For these purposes, the following representative peatland sites were analyzed within this study: *Randow-Welse-Niederung*, *Bieselfieß*, *Hundekehlefenn* and *Lietzengraben-Niederung*.

In a first step CO<sub>2</sub> release rates were measured in the laboratory using incubating experiments with undisturbed soil samples at various temperatures and soil moisture ranges. Measurements were used for statistical analysis to derive nonlinear CO<sub>2</sub> release functions for various peat substrates. These equations only required temperature and soil moisture values to predict daily CO<sub>2</sub> release and were incorporated into numerical simulation models such as HYDRUS 1D to predict the daily CO<sub>2</sub> release. In a second step the numerical model was calibrated using peat loss measurements gained from lysimeter studies as well as peat thickness measurements over various time spans.

In the third step, we calculated daily soil water components and CO<sub>2</sub> release for a variety of peat profiles and different environmental conditions. This method allowed us to study the effects of different climate, land use, and groundwater levels on CO<sub>2</sub> emissions.

In a fourth step GIS-based peat thickness maps for the “Randow-Welse” area were predicted using geo-referenced site information. For this, peat thickness data from 1964 of the “HUB Moorarchiv” was combined with recently mapped peat thickness data of KLUGE 2008, 2011/12 and LBGR, Brandenburg. As a result, site-specific peat losses could be derived. Actual peat thicknesses as well as future peat thickness loss were calculated for various site conditions.

In order to derive simple CO<sub>2</sub> release functions for regionalization techniques, literature data as well as our own CO<sub>2</sub> measurements and predicted CO<sub>2</sub> release were analyzed statistically. This information was combined with available regional data to determine the CO<sub>2</sub> release potential for the “Randow-Welse” area.

Finally we developed “easily usable” nomograms allowing a rough estimation of CO<sub>2</sub> release for peat soils for various environmental conditions. These nomograms only require data of peat composition, peat thickness, and land use, and are representative for climate conditions of the northern part of Central Europe.

## Zusammenfassung

Ziel des Teilprojekts 5 „Nachhaltige Moornutzung“ im ELaN Forschungsverbund ist die Entwicklung standortbezogener Handlungsstrategien für nachhaltige Bewirtschaftungsoptionen landwirtschaftlich genutzter Niedermoore. Hierfür wird ein webbasiertes Entscheidungs- und Unterstützungssystem (DSS) „Nachhaltige Moornutzung“ von der HU Berlin (Frau Prof. Dr. Zeitz), der HNE Eberswalde (Frau Prof. Dr. Luthardt) und der TU Berlin (Prof. Dr. G. Wessolek) entwickelt, welches Empfehlungen für eine nachhaltige Nutzung liefern soll. Eine wichtige Grundlage dieses DSS ist die Bestimmung und Regionalisierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Niedermooren unter verschiedenen Landnutzungen.

Im ersten Schritt wurden hierfür CO<sub>2</sub>-Emissionen von unterschiedlichen Niedermoorstandorten im Berliner und Brandenburger Raum bestimmt. Dazu wurden ungestörte Torfproben aus folgenden Niedermooren entnommen und die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate im Labor gemessen: *Randow-Welse-Niederung*, *Bieselfieß*, *Hundekehlefenn* und *Lietzengraben-Niederung*.

Im zweiten Schritt konnten daraus mittels nichtlinearer Regressionsanalysen standortspezifische Freisetzungsfunktionen durch die unabhängigen Größen Temperatur und Wassergehalt beschrieben werden, welche in das numerische Simulationsmodell (HYDRUS 1D) integriert wurden. Diese Kopplung ermöglichte es, die Einflüsse von Klima, Landnutzung und Grundwasserstand auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen über Simulationsfallstudien zu ermitteln.

Im dritten Schritt wurden GIS-basierte Moormächtigkeitskarten für den Niedermoorstandort Randow-Welse-Niederung erstellt. Hierfür wurde der Moorverlust aus Moormächtigkeitsangaben des Moorarchivs der Humboldt Universität Berlin (HUB) mit aktuellen Geländeaufnahmen von Moormächtigkeiten und Lagerungsdichten (KLUGE 2008, 2011/12 und dem LBGR, Brandenburg) berechnet. Als Ergebnis wurden flächenspezifische Abnahmen für unterschiedliche Moormächtigkeiten abgeleitet sowie gegenwärtige Moormächtigkeitskarten für die Randow-Welse-Niederung erzeugt.

Mit diesen Moormächtigkeitsdaten wurden CO<sub>2</sub>-Emissionen für verschiedene Nutzungstypen berechnet und GIS-basiert auf die Fläche der Randow-Welse-Niederung angewendet.

Aus unseren Messungen und Literaturdaten wurden allgemeine CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen entwickelt, die mit Hilfe einfacher, leicht zur Verfügung stehender Flächen- und Lagerungsdaten benutzt werden können, um CO<sub>2</sub>-Emissionen von Niedermooren ermitteln zu können. Als Ergebnis entstanden einfache Nomogramme für die Praxis; sie gelten für Klimabedingungen des nördlichen Mitteleuropas.

# Inhaltsverzeichnis

Erschienenene ELaN Discussion Paper

Impressum und der ELaN-Forschungsverbund

Förderung

Vorwort

Abstract und Zusammenfassung

**Inhaltsverzeichnis**

**Abbildungsverzeichnis**

**Tabellenverzeichnis**

**Abkürzungsverzeichnis**

	Seite
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Allgemeine Grundlagen.....</b>	<b>2</b>
2.1. Verbreitung von Mooren .....	2
2.2. Moore als Kohlenstoffsенke .....	2
2.3. Moordegradierung .....	3
2.3.1. Mineralisation .....	4
2.3.2. Moore und der Klimawandel .....	4
2.4. Einflussgrößen der CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus Mooren .....	5
2.4.1. Temperatur/Klima .....	5
2.4.2. Grundwasserstand.....	5
2.4.3. Ausgangssubstrat, Degradierungszustand, Moormächtigkeit...	6
2.4.4. Landnutzung .....	6
2.5. Methoden zur Bestimmung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus Mooren.....	7
2.5.1. Höhenabnahme .....	7
2.5.2. CO <sub>2</sub> -Flussmessung.....	7
2.5.3. Labormessung mit Respirometern .....	7
2.5.4. Modellierung .....	8
2.6. Literaturwerte zur CO <sub>2</sub> Freisetzung aus Mooren.....	8
2.6.1. International.....	8
2.6.2. Europa .....	9
2.6.3. Gemäßigte Breiten / Deutschland .....	10
<b>3. Material und Methoden.....</b>	<b>12</b>
3.1. Probennahme in den Untersuchungsgebieten.....	13
3.2. Laboruntersuchungen .....	14
3.2.1. Messung der CO <sub>2</sub> -Freisetzungrate (Bodenatmung).....	14
3.2.2. Probenaufbereitung.....	14

3.2.3. Messprinzip des Inkubationsexperiments .....	14
3.3. Weitere Laboruntersuchungen.....	15
3.4. Numerische Modellierung mit HYDRUS 1D .....	15
3.4.1. Eingabeparameter HYDRUS 1D .....	16
3.4.2. Berechnung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung .....	19
3.5. Erstellung einer aktuellen Moormächtigkeitkarte Randow-Welse-Niederung.....	20
3.6. GIS-basierte Szenarienbildung.....	20
3.6.1. Moormächtigkeit .....	20
3.6.2. CO <sub>2</sub> -Freisetzung Randow-Welse-Niederung.....	21
<b>4. Ergebnisse.....</b>	<b>22</b>
4.1. Aktuelle GIS-basierte Moormächtigkeitkarte Randow-Welse-Niederung.....	22
4.2. Laborergebnisse .....	25
4.2.1. Bodenphysikalische Eigenschaften.....	25
4.2.2. Bodenchemische Eigenschaften .....	27
4.2.3. Thermische Eigenschaften .....	27
4.2.4. CO <sub>2</sub> -Freisetzungsraten der Torfe.....	28
4.2.5. CO <sub>2</sub> -Freisetzungsfunktionen .....	31
4.3. Simulationsfallstudien Randow-Welse-Niederung .....	32
4.3.1. Temperaturhaushalt der Niedermoorprofile .....	32
4.3.2. Wasserhaushalt der Niedermoorprofile .....	33
4.3.3. CO <sub>2</sub> -Freisetzung in verschiedenen Bodentiefen .....	35
4.3.4. CO <sub>2</sub> -Freisetzung für verschiedene Grundwasserstände.....	37
4.3.5. Klimaeinfluss.....	38
4.3.6. CO <sub>2</sub> -Freisetzung bei verschiedenen Landnutzungen .....	39
4.3.7. Kalibrierung der CO <sub>2</sub> Modellergebnisse.....	40
<b>5. Regionalisierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.....</b>	<b>42</b>
5.1. Ableitung aus Literaturstudien .....	42
5.2. Ableitung aus Messdaten und Modellierung .....	43
<b>6. Szenarien: Moormächtigkeitabnahme Randow-Welse-Niederung .</b>	<b>46</b>
<b>7. Szenarien: CO<sub>2</sub>-Freisetzung Randow-Welse-Niederung.....</b>	<b>49</b>
<b>8. Fazit .....</b>	<b>52</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>54</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	
<b>Anhang</b>	

## Abbildungsverzeichnis

	Seite
<b>Abbildung 1:</b> Lage und Verteilung von Moorflächen in Deutschland .....	2
<b>Abbildung 2:</b> Mittlere Jährliche CO <sub>2</sub> -Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten.....	9
<b>Abbildung 3:</b> Jährliche CO <sub>2</sub> -Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten in Europa.....	10
<b>Abbildung 4:</b> Jährliche CO <sub>2</sub> -Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten in den gemäßigten Breiten .....	10
<b>Abbildung 5:</b> Vorgehensweise zur flächenhaften Berechnung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung..	13
<b>Abbildung 6:</b> Mittlere Tagesniederschläge und Temperaturen eines kalt-feuchten, warm- trockenen und durchschnittlichen Jahres.....	18
<b>Abbildung 7:</b> Exemplarische Grundwasseramplituden bei verschiedenen Nutzungsformen und Grundwassertemperatur.....	19
<b>Abbildung 8:</b> Digitalisierte Moormächtigkeitkarte der Randow-Welse-Niederung 1964 und der Referenzfläche Wendemark .....	23
<b>Abbildung 9:</b> Aktualisierte Moormächtigkeitkarte der Randow-Welse-Niederung 2012 und der Referenzfläche Wendemark 2012.....	24
<b>Abbildung 10:</b> Gemessener Wassergehalt bei verschiedenen pF- Stufen und angepasste Wasserretentionsfunktion der Torfe .....	26
<b>Abbildung 11:</b> Gemessener Wassergehalt bei verschiedenen pF- Stufen und angepasste Wasserretentionsfunktion der Mudden .....	26
<b>Abbildung 12:</b> Mittlere CO <sub>2</sub> -Freisetzung verschiedener Torfsubstrate in Abhängigkeit von Inkubationstemperatur und pF-Stufe.....	29
<b>Abbildung 13:</b> Lufttemperatur (T Luft) und modellierte Bodentemperaturen (T 10 cm; T 20 cm und T 60 cm) in verschiedenen Tiefen.....	32
<b>Abbildung 14:</b> Jahresverlauf der gemessenen Lufttemperatur und Bodentemperatu- ren in verschiedenen Tiefen eines Niedermoorprofils im Donauried ...	33
<b>Abbildung 15:</b> Modellierte Wassergehalte (oben) und Wasserspannungen (unten) des Niedermoorprofils RAW MM in verschiedenen Tiefen.....	34
<b>Abbildung 16:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzungsraten in einem mittleren Klimajahr (1989) ausge- wählter Tiefen des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) .....	35
<b>Abbildung 17:</b> Kumulative CO <sub>2</sub> -Freisetzung eines Jahres in verschiedener Bodentiefen des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) .....	36
<b>Abbildung 18:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzung des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) bei verschiedenen Grundwasserständen unter Grünlandnutzung .....	37
<b>Abbildung 19:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzung des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) unter extensiver und intensiver Grünlandnutzung für drei verschiedene Klimajahre .....	38
<b>Abbildung 20:</b> Jahresverlauf der CO <sub>2</sub> -Freisetzungsraten des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) bei unterschiedlichen Landnutzungen .....	39
<b>Abbildung 21:</b> Kumulierte CO <sub>2</sub> -Freisetzung des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) bei unterschiedlicher Landnutzung .....	40

<b>Abbildung 22:</b> Vergleich C-Profilbilanzierung von verschiedenen Niedermoorprofilen über insgesamt 40 Jahre mit den Ergebnissen des erstellten Modells.....	41
<b>Abbildung 23:</b> Jährliche CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus mächtigen norddeutschen Niedermooren unter Grünlandnutzung in Abhängigkeit vom Grundwasserstand .....	42
<b>Abbildung 24:</b> Nomogramm zur Ableitung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus nordostdeutschen Niedermooren (reine Torfe) unter Grünland- und Ackernutzung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit und dem Grundwasserstand .....	44
<b>Abbildung 25:</b> Nomogramm zur Ableitung der CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus norddeutschen Niedermooren (Torfe und 30 % Muddenanteil Unterboden) unter Grünland- und Ackernutzung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit und dem Grundwasserstand .....	45
<b>Abbildung 26:</b> Szenario sektorale Abnahme der Moormächtigkeiten in der Randow-Welse-Niederung bis 2060 unter Grünlandnutzung mit mittlerem Grundwasserstand von 60 cm .....	47
<b>Abbildung 27:</b> Szenario sektorale Abnahme der Moormächtigkeiten in der Randow-Welse-Niederung bis 2060 unter Grünlandnutzung einem mittleren Grundwasserständen von 40 cm .....	48
<b>Abbildung 28:</b> Status Quo der CO <sub>2</sub> -Freisetzung der landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Teils der Randow-Welse-Niederung unter Berücksichtigung der Moormächtigkeiten und der Landnutzung.....	50
<b>Abbildung 29:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzung der landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Teils der Randow-Welse-Niederung unter Berücksichtigung der Moormächtigkeiten und der Landnutzung unter der Annahme einer Erhöhung der extensiven Grünlandnutzung um 30 % .....	51

## Tabellenverzeichnis

	Seite
<b>Tabelle 1:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzungsraten aus entwässerten Moorböden in Deutschland.....	11
<b>Tabelle 2:</b> Charakterisierung der Untersuchungsgebiete .....	14
<b>Tabelle 3:</b> Analysemethoden zur Bestimmung der Torfeigenschaften .....	15
<b>Tabelle 4:</b> Annahmen und Eingabeparameter für die Modellstudien mit HYDRUS 1D 17	
<b>Tabelle 5:</b> Gesamtabnahmen und mittlere Mächtigkeitsabnahmen innerhalb von 40 Jahren in den verschiedenen Moormächtigkeitsbereichen .....	21
<b>Tabelle 6:</b> Sektorale Mächtigkeitsabnahmen in verschiedenen Zeitabschnitten mit unterschiedlicher Landnutzung in den Moormächtigkeitsbereichen .....	21
<b>Tabelle 7:</b> Vergleich der berechneten Moormächtigkeit der Moormächtigkeitskarte 2012 mit verschiedenen Geländeaufnahmen (sektorale Abnahmen).....	22
<b>Tabelle 8:</b> Bodenphysikalische Eigenschaften der Torfsubstrate .....	25
<b>Tabelle 9:</b> Bodenchemische Analysedaten und Partikeldicke der Torfsubstrate.....	27

<b>Tabelle 10:</b> Wärmeleitfähigkeit der Torfsubstrate BIES und RAW bei verschiedenen Wassergehalten .....	28
<b>Tabelle 11:</b> CO <sub>2</sub> -Freisetzungsfunktionen der untersuchten Torfsubstrate .....	31
<b>Tabelle 12:</b> Sektorale Gesamtabnahmen der Moormächtigkeit unter Grünlandnutzung bei mittlerem Grundwasserstand von 60 cm und 40 cm .....	46
<b>Tabelle 13:</b> Szenario: CO <sub>2</sub> -Freisetzung südliche Randow-Welse-Niederung bei verschiedenen mittleren Grundwasserständen .....	49

## Abkürzungsverzeichnis

BIES	Bieselfließ-Torf
C/N	Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff
C <sub>org</sub>	organischer Kohlenstoffgehalt
DSS	Entscheidungs- u. Unterstützungssystem ( <i>Decision-making and Support System</i> )
DTK 25	Digitale Topographische Karte 1: 25 000
GOK	Geländeoberkante
GPV	Gesamtporenvolumen
Gt	Gigatonnen
GV	Glühverlust
GW	Grundwasser
HKF	Hundekehlefenn-Torf
HNE	Fachhochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
HU – Berlin	Humboldt Universität zu Berlin
LGB	Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
Nd	Niederschläge
OB	Oberboden
pF	dekadischer Logarithmus der Bodenwasserspannung (log <sub>10</sub> (-h)) in cm Wassersäule
PIK	Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung
RAW	Randow-Welse-Niederung – Randow-Welse-Torfe
Temp.	Temperatur
TRD	Trockenrohdichte
TU – Berlin	Technische Universität Berlin
u. GOK	unter Geländeoberkante
UB	Unterboden

## 1. Einleitung

Aufgrund reduzierter und stark verlangsamter Stoffumsetzungsprozesse stellen natürliche Moore – abhängig vom Wasserhaushalt – eine Senke für Kohlenstoff dar. In Moorböden sind Schätzungen zufolge 450 - 500 Gt Kohlenstoff gebunden; Moore spielen daher eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf

Die Moore Deutschlands nehmen etwa einen Flächenanteil von 4 % ein, was einer Fläche von ca. 14.000 km<sup>2</sup> entspricht. Der größte Teil der Moore Deutschlands ist drainiert und wird landwirtschaftlich genutzt. Mit der Entwässerung verlieren Moore ihre ursprüngliche Senkenfunktion für Kohlenstoff, Stickstoff und andere Nährstoffe. Die Absenkung des Grundwasserspiegels führt neben dem Verlust von ökologisch wertvollen Flächen auch zu einer Änderung der bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften der Torfe, Moormächtigkeitsverlusten sowie zu einer Torfmineralisierung. Bei der Torfmineralisierung kommt es zu einer Mobilisierung des im Boden gebunden Kohlenstoffs. Dieser wird in Form von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre abgegeben. CO<sub>2</sub> ist ein klimarelevantes Spurengas das maßgeblich an der Erhöhung des Treibhauseffektes beteiligt ist.

Durch die prognostizierten Klimaveränderungen (steigende Temperaturen bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge) ist ein weiteres Absinken der Grundwasserstände anzunehmen, was wiederum zu einer erhöhten Mineralisierung und steigenden CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten führen würde.

In Brandenburg erhöht sich der Nutzungsdruck auf die Moorflächen durch den verstärkten Anbau nachwachsender Rohstoffe für die Energieproduktion. Eine Nutzungsänderung, wie z.B. der intensive Anbau von Energiepflanzen wie Mais oder Raps könnten wiederum eine verstärkte Entwässerung zur Folge haben. Extensivierungen von intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen dagegen eröffnen ein Potenzial zur Wiedervernässung bzw. Anhebung der Grundwasserstände.

Da die ausschlaggebenden Faktoren der CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Mooren der vorherrschende Grundwasserstand und die Landnutzung sind, können sich aus Nutzungsänderungen, mit Ziel einer Extensivierung von Landnutzungen, große CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale ergeben.

Im Rahmen des ELaN Forschungsverbundes war es daher unsere Aufgabe CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Flächentyp „Niedermoore“ zu bestimmen, um so standortbezogene Handlungsstrategien für eine nachhaltige Bewirtschaftung von landwirtschaftlich genutzten Niedermooren entwickeln zu können. Die ermittelten Daten zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Niedermooren werden in das DSS „Nachhaltige Moornutzung“ des TP 5 eingepflegt und liefern so wichtige Informationen im Rahmen von Planungs- und Entscheidungsprozessen.

## 2. Allgemeine Grundlagen

### 2.1. Verbreitung von Mooren

Die globalen Verbreitungsschwerpunkte von Mooren liegen in Kanada, Alaska, Nordeuropa, West Sibirien, Südostasien und im Amazonasbecken. Aber auch Mitteleuropa kann zu den Regionen der Erde gezählt werden, in denen ein hoher prozentualer Anteil der Landfläche von Mooren bedeckt ist (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Die Moore Deutschlands konzentrieren sich hauptsächlich auf die nördlichen und südlichen Bundesländer (Abb. 1).

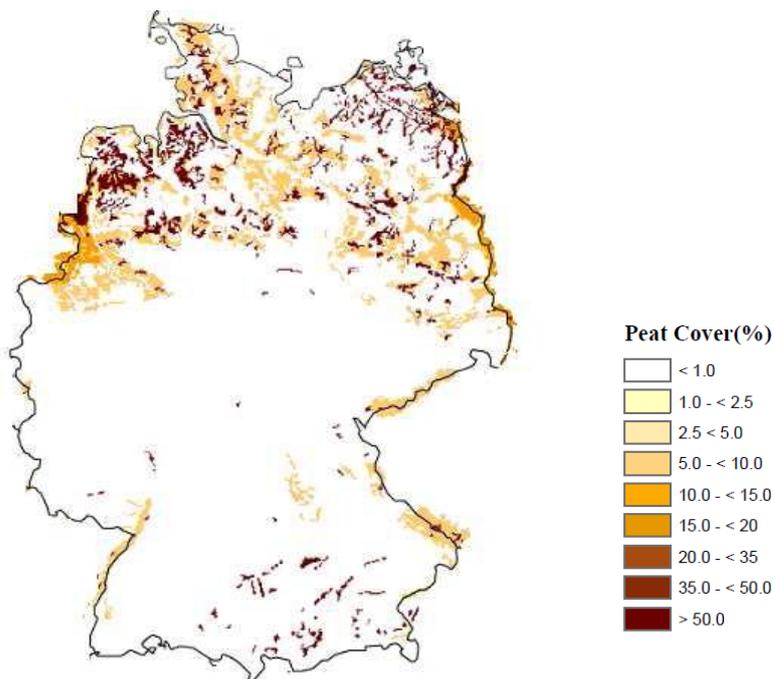


Abbildung 1: Lage und Verteilung von Moorflächen in Deutschland (nach HIEDERER 2006).

### 2.2. Moore als Kohlenstoffsенке

Natürliche Moore sind Ökosysteme, die durch ihren speziellen Stoffhaushalt in der Natur eine Sonderstellung einnehmen. Die hohe Schutzwürdigkeit von Mooren ergibt sich aus der Tatsache, dass sie eine langfristige Senke im globalen Stoffkreislauf bilden können und im intakten Zustand als Wasserspeicher eine bedeutende Rolle im Landschaftswasserhaushalt spielen (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Die permanente Wassersättigung des Moorkörpers ist dabei der entscheidende Faktor für die Existenz und Funktionalität von Mooren.

Der Abbau von abgestorbener pflanzlicher Biomasse ist in Mooren unter Luftabschluss in der wassergesättigten Zone stark reduziert. Abgestorbenes Pflanzenmaterial kann daher nur zu einem geringen Teil von anaeroben Mikroorganismen abgebaut werden (BYRNE et al. 2004).

Durch Torfbildung wird der restliche Teil der abgestorbenen Biomasse langfristig im wassergesättigten Moorboden gespeichert.

In ungestörten Mooren nehmen Pflanzen durch Photosynthese mehr  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre auf, als durch mikrobiellen Abbau wieder freigesetzt wird. Über eine Torfakkumulation können so bis zu  $2100 \text{ kg CO}_2\text{-C*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$  im Boden fixiert werden (AUGUSTIN 2001).

Weltweit sind etwa 450 bis 500 Gt Kohlenstoff in Moorböden gespeichert (BRIDGHAM et al. 1992, JOOSTEN & CLARKE 2002, PARISH et al. 2008). Diese Menge entspricht ungefähr einem Drittel des insgesamt in allen Böden gebundenen Kohlenstoffes. Naturnahe Moore sind daher eine wichtige Senke für atmosphärisches  $\text{CO}_2$ .

### 2.3. Moordegradierung

Eine Entwässerung der Moore führt dazu, dass die Torfbildung gestoppt wird, eine Durchlüftung einsetzt und bodenbildende Prozesse eingeleitet werden. Die durch Entwässerung hervorgerufene Bodenentwicklung hat eine Änderung der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Torfe zur Folge. Die durch eine Absenkung des Moorwasserspiegels ausgelösten Prozesse im Boden lassen sich nach SCHMIDT (1981) unterteilen in:

- Moorsackung
- Schrumpfung und Quellung
- Humifizierung
- Mineralisation
- Verlagerungs- und Auswaschungsvorgänge

In der Literatur werden diese Teilprozesse zusammenfassend als Moorschwund oder Moorverlust bzw. Moormächtigkeitsverlust bezeichnet (SCHMIDT 1981). Durch den Moorschwund kommt es zu einer Freisetzung von  $\text{CO}_2$  aus dem Boden in die Atmosphäre ( $\text{CO}_2\text{-C}$ )<sup>1</sup>. Der für die  $\text{CO}_2$ -Emission entscheidende Teilprozess des Moorschwundes ist die Mineralisation (HÖPER 2007). Im Folgenden wird daher nur auf den Teilprozess der Mineralisation eingegangen.

---

<sup>1</sup> Der Begriff  $\text{CO}_2\text{-C}$  wird im Folgenden bei Mengenangaben von bodenbürtigem  $\text{CO}_2$  pro Flächeneinheit und Zeit verwendet. Der Begriff  $\text{CO}_2$  wird im Text zur Beschreibung von Emissionen aus Mooren verwendet, ohne hierbei Brutto oder Netto- Emissionen zu quantifizieren. Die Umrechnung von  $\text{CO}_2\text{-C}$  in  $\text{CO}_2$  erfolgt mit dem Faktor 3,67, da sich 12 kg C (Kohlenstoff) mit 32 kg  $\text{O}_2$  (Sauerstoff) zu 44 kg  $\text{CO}_2$  verbinden.

### 2.3.1. Mineralisation

Durch das Absenken des Grundwasserspiegels wird die permanent wasser-gesättigte Bodenzone im Moor herabgesetzt, was zu einer Vergrößerung der durchlüfteten Bodenzone führt. In dieser kommt es durch aerobe mikrobielle Abbauprozesse zu einer Torfzehrung.

Durch die Mineralisierung des Torfkörpers kommt es zu einer Mobilisierung von verschiedenen wassergebundenen Stoffströmen aus dem Stoffpool. Dies sind vor allem mineralische Stickstoff-, Phosphor- und Kohlenstoffverbindungen, die zu einer verstärkten Eutrophierung von Gewässern führen (KOPPISCH 2001). Weiterhin führt die Mineralisation zu einer Emission klimarelevanter Spurengase wie z.B.  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  in die Atmosphäre (AUGUSTIN 2001).

Nach MUNDEL (1976) ist das aus dem Boden entweichende  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2\text{-C}$ ) ein direktes, wenn auch aufwändig zu bestimmendes Maß für den oxidativen Torfverzehr, da  $\text{CO}_2$  ein Endprodukt der mikrobiellen Aktivität darstellt.

### 2.3.2. Moore und der Klimawandel

Atmosphärisches  $\text{CO}_2$  ist ein klimawirksames Gas, das einen großen Anteil am globalen Treibhauseffekt hat. Im Zuge der Industrialisierung ist die Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre markant gestiegen, was eine gravierende Änderung des globalen Klimas zur Folge hat (FORSTER et al. 2007).

Das Klimamodell „STAR“, das vom Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung entwickelt wurde, prognostiziert einen Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur in Brandenburg um 1,5 K bis zum Jahr 2050. Im selben Zeitraum wird mit einem Rückgang der durchschnittlichen Sommerniederschläge um bis zu 40 mm gerechnet. Für das Ökosystem Moor kann der Wandel des Klimas eine Änderung des Wasser- und Temperaturhaushaltes bedeuten. In den Sommermonaten könnte so der GW-Spiegel, bedingt durch den Rückgang der Sommerniederschläge, stärker absinken als in der Vergangenheit. Der prognostizierte Anstieg der mittleren Jahrestemperatur hätte auch zur Folge, dass die mittlere Bodentemperatur ansteigt. Diese veränderten Umweltbedingungen würden dazu führen, dass sich der bereits stattfindende Moorschwund weiter beschleunigt. So könnte die Mineralisation des Torfkörpers durch die veränderten klimatischen Bedingungen begünstigt werden, was eine vermehrte Freisetzung von  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre zur Folge hätte (KLUGE et al. 2008). Diese Zusammenhänge wurden erstmals für das Elbeinzugsgebiet, speziell für den Spreewald im Rahmen des GLOWA Projekts (LORENZ 2008 und WECHSUNG et al. 2005) dargelegt.

## 2.4. Einflussgrößen der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Mooren

Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Niedermooren wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst; die wichtigsten sind:

- Grundwasserstand (Wassergehalt des Bodens)
- Bodentemperatur bzw. das Klima (Lage des Gebietes)
- Torfart und -degradierung (Substrattyp, C-Gehalt)
- Vegetation bzw. die Art der Bewirtschaftung (Drainage, Düngung)

Die Freisetzung der klimarelevanten Spurengase NO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> aus dem Moorboden korreliert ebenfalls mit den genannten Faktoren (LORENZ 2008). Im Folgenden werden kurz die einzelnen Einflussgrößen erläutert.

### 2.4.1. Temperatur/Klima

Die Bodentemperatur hat einen großen Einfluss auf die Freisetzung von Spurengasen aus Mooren. Neben dem Jahresgang der Temperatur ist auch die mittlere Boden- und Lufttemperatur von wesentlicher Bedeutung (LAIHO et al. 2004). Bei ausreichender Bodenfeuchte verbessern sich mit steigender Temperatur die Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen. Dies hat zur Folge, dass es insgesamt zu einer verstärkten Mineralisation des Torfes und damit zu einer vermehrten Freisetzung von CO<sub>2</sub> kommt (DAVIDSON & JANSSENS 2006). Die starke Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrates von der Bodentemperatur wurde in zahlreichen Untersuchungen bestätigt (MUNDEL 1976, WESSOLEK et al. 2002, DRÖBLER 2005, KLUGE et al. 2008, BERGLUND et al. 2008).

### 2.4.2. Grundwasserstand

Der Grundwasserstand ist ein bedeutender Faktor für die Höhe der Freisetzung klimarelevanter Spurengase (AUGUSTIN 2001, WESSOLEK et al. 2002, PARISH et al. 2008). In Mooren mit einem hohen Grundwasserstand und einer torfbildenden Vegetation kommt es zu einer Netto-CO<sub>2</sub>-Bindung (Torfakkumulation) aus atmosphärischen CO<sub>2</sub> (AUGUSTIN 2001). Nach ebd. liegen die CO<sub>2</sub>-Bindungsrates für Mitteleuropa im Durchschnitt bei 170 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> mit einem Schwankungsbereich von 100 bis 2100 kg CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>.

Wird der Grundwasserstand abgesenkt, kommt es zu einer Durchlüftung der oberen Bodenschichten mit im wechselfeuchten Zustand folgender Mineralisierung und Anstieg der CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass eine eindeutige Abhängigkeit zwischen dem Grundwasserstand und der CO<sub>2</sub>-Freisetzung besteht (MUNDEL 1976, WESSOLEK et al. 2002, CHIMNER & COOPER 2003, KLUGE et al. 2008, COUWENBERG et al. 2008, COUWENBERG et al. 2011).

Dabei nimmt die CO<sub>2</sub>-Freisetzung mit sinkendem GW-Stand zu und erreicht bei einem bestimmten GW-Stand eine maximale CO<sub>2</sub>-Freisetzung, bei tieferem GW-Stand geht die CO<sub>2</sub>-Freisetzung zurück (MUNDEL 1976, WESSOLEK et al. 2002, RENGGER et al. 2002, KLUGE et al. 2008, LORENZ 2008). Dieser Rückgang hängt vermutlich mit der starken

Austrocknung des Oberbodens zusammen. Bei sehr tiefen Grundwasserständen kann kein Wasser mehr durch kapillaren Aufstieg in die obere Bodenschicht nachgeliefert werden. Die Mikroorganismen geraten bei tiefen GW-Ständen daher in eine Wasserstresssituation, was zu verminderter Aktivität und damit zu geringeren CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten führt (LAHIO 2006).

#### 2.4.3. Ausgangssubstrat, Degradierungszustand, Moormächtigkeit

Neben den zuvor genannten Faktoren haben auch die Ausgangssubstrate einen großen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Dabei sind die Torfart, also das pflanzliche Ausgangsmaterial, wie Schilf, Seggen, Moos, etc. sowie dessen C/N Verhältnis und der pH-Wert des Bodens für die CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Bedeutung.

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Stoffumsetzungsprozesse im Boden und damit auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung haben auch die bodengenetischen Veränderungen des Torfes. Die Degradierung des Torfes durch Vererdung und Vermulmung spielt dabei eine entscheidende Rolle (WESSOLEK et al. 1999, ZEITZ & VELTY 2002, RENGGER et al. 2002).

Weiterhin hat die Torfmächtigkeit selbst einen Einfluss auf die Rate des freigesetzten CO<sub>2</sub>. Mit abnehmender Mächtigkeit des Torfkörpers, welche auch im Zusammenhang mit fortschreitender Degradierung steht, nimmt auch Freisetzung von CO<sub>2</sub> ab (MUNDEL 1976, RENGGER et al. 2002, KLUGE et al. 2008).

#### 2.4.4. Landnutzung

Um Moorflächen für die Landwirtschaft nutzbar zu machen, bedarf es einer Entwässerung durch Meliorationsmaßnahmen. Dadurch wird auch eine Freisetzung von Stickstoff induziert, die erst im Laufe der Jahre abnimmt. Nach unmittelbarer Melioration war daher zunächst keine weitere N-Düngung erforderlich. Erst später, nach Abfall der ersten starken N-Mineralisierungsschübe, erfordert die intensive landwirtschaftliche Produktion eine zusätzliche Düngung.

Eine weitere Form der Landnutzungsänderung ist der Grünlandumbruch nach Grundwasserabsenkungen, der in den 70iger bis 90iger Jahren zu großen Veränderungen in der Landschaft führte. Diese Landnutzungsänderungen veränderten die bodenphysikalischen und bodenchemischen Standorteigenschaften und führten in der Summe zu einer drastischen Steigerung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung (STEGEMANN & ZEITZ 2001, OLESZCZUK et al. 2008, KECHAVARZI et al. 2009).

Neben der Landnutzung hat auch der Pflanzenbestand selbst einen Einfluss auf die Freisetzung von Spurengasen aus dem Boden. Der Anteil der Wurzelatmung an der CO<sub>2</sub>-Emission kann nach Untersuchungen von HAPPELL & CHANTON (1993) zwischen 6 und 60 % liegen.

## 2.5. Methoden zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Mooren

Um die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Moorböden zu bestimmen gibt es unterschiedliche Methoden (vgl. KASIMIR-KLEMEDTSSON et al. 1997), die folgend aufgelistet sind:

- Abschätzung der Emission durch Erfassung der Höhenabnahme
- Messung des CO<sub>2</sub>-Flusses im Gelände
- Labormessungen an Substraten mittels Respirometer oder Micro-Qxymax
- Modellierung

### 2.5.1. Höhenabnahme

Unmittelbar nach der Entwässerung des Moores kommt es zu starken Höhenverlusten, die primär durch die Verdichtung der entwässerten Torfschicht verursacht werden. Nach diesem Sackungsprozess ist der Abbau des Torfes durch Mikroorganismen der primäre Grund für weitere Höhenabnahmen (KASIMIR-KLEMEDTSSON et al. 1997). Aus dem jährlichen Höhenverlust kann, bei Kenntnis der Lagerungsdichte, näherungsweise der Kohlenstoffverlust des Bodens berechnet werden (HÖPER 2007; RENGGER et al. 2002). Eine genauere Abschätzung ermöglicht eine Profibilanzierung. Dabei wird die Änderung der Lagerungsdichte, des C-Gehaltes und der Mächtigkeit der einzelnen Torfschichten durch eine Beprobung zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst (KLUGE et al. 2008, ROGIERS et al. 2008, LEIHFELD et al. 2011).

### 2.5.2. CO<sub>2</sub>-Flussmessung

Bei dieser Methode wird die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Boden mit Hilfe eines geschlossenen Haubensystems erfasst. Die Gaskonzentration unter der Haube wird in regelmäßigen Abständen gemessen. Alternativ wird der Gasfluss mittels „tower-flux-measurements“ gemessen. Dabei wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft nahe der Bodenoberfläche in verschiedenen Höhen bestimmt. Über den Gradienten der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft ist es möglich, die Netto CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Boden zu berechnen (GRANT & ROULET 2002).

### 2.5.3. Labormessung mit Respirometern

Im Labor erfolgt eine Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Torfproben in Abhängigkeit von Temperatur und Wassergehalt mit Respirometern wie Respirocond oder Micro-Oxymax (vgl. Kap. 4). Durch eine Verknüpfung der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrates mit Bodenwasser- und Temperaturhaushaltsdaten wird die Gesamtsumme des aus dem Boden freiwerdenden CO<sub>2</sub> bilanziert (WESSOLEK et al. 2002, KLUGE et al. 2008, LORENZ 2008).

#### 2.5.4. Modellierung

Mit Hilfe von numerischen Modellen ist eine Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Mooren möglich. Kernelement der Berechnung sind Mineralisierungs- bzw. CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen sowie hydraulische und thermische Eigenschaften der Niedermoorprofile, die zumeist unter Laborbedingungen gewonnen wurden.

Als Randbedingung müssen die Klimadaten des Untersuchungsgebietes sowie die jahreszeitliche Dynamik des Bodenwasserhaushaltes in das Modell einfließen. Wichtig ist, dass die Modelle aufgrund von Geländemessungen kalibriert werden (WESSOLEK et al. 2002).

### 2.6. Literaturwerte zur CO<sub>2</sub> Freisetzung aus Mooren

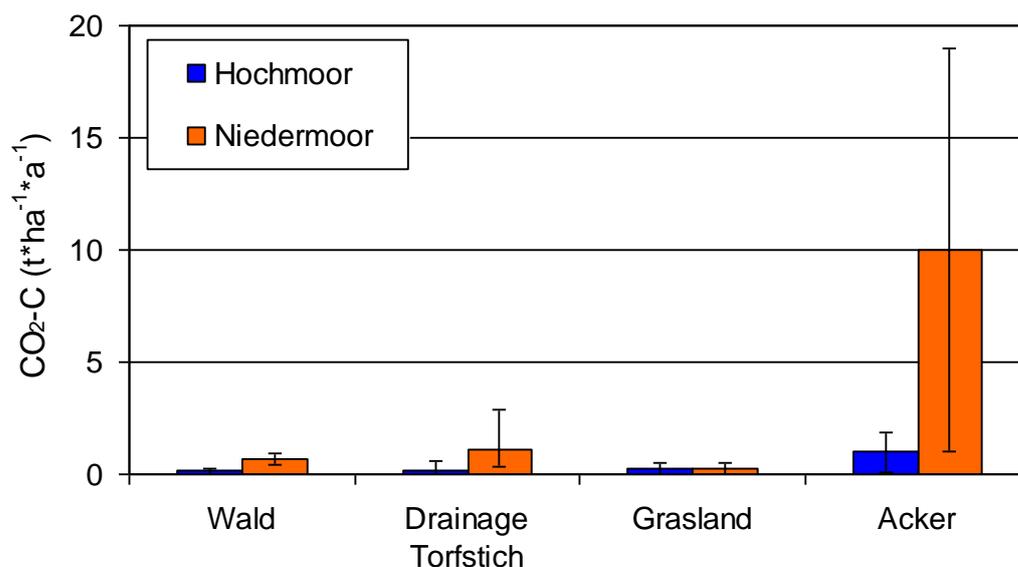
Es gibt eine Vielzahl nationaler und internationaler Studien, die sich mit der CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Mooren befassen. Im folgenden Kapitel werden repräsentative Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt und miteinander verglichen.

#### 2.6.1. International

Weltweit gibt es zahlreiche Studien und Forschungsprojekte, die sich mit der Problematik von CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Mooren befassen. Ein Großteil der Untersuchungen wurde in Europa, insbesondere in Skandinavien, und in Nordamerika durchgeführt. Auch die Vereinten Nationen haben im Zuge der Bildung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Informationen zur Freisetzung klimarelevanter Gase aus Mooren zusammengetragen. Im Bericht „Good Practice Guidance - Land Use, Land Use Change and Forestry“ (GPG-LULUCF) werden mittlere CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Moorböden abgeleitet. Dabei wird folgende Unterteilung in verschiedene Moortypen und Nutzungsarten vorgenommen (Abb. 2).

Der IPCC gibt Emissionswerte zwischen 0,25 und 10 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> an. An den teilweise sehr großen Streuungen der Literaturdaten zeigt sich, dass selbst bei gleicher Nutzungsart und gleichem Moortyp sehr unterschiedliche Werte für die CO<sub>2</sub>-Freisetzung gemessen wurden (Abb. 2). Dies war zu erwarten, da in dem GPG-LULUCF Bericht (2003) Emissionswerte aus Studien zusammengetragen wurden, die in verschiedenen Regionen der Welt durchgeführt worden sind.

Die unterschiedlichen klimatischen und morphologischen Bedingungen der Untersuchungsgebiete haben jedoch einen ganz entscheidenden Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Moor (vgl. Kap.2.4).



**Abbildung 2:** Mittlere jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten. Die Balken stellen die Streuung der Literaturdaten dar (Daten: IPCC GPG 2004, IPCC GPG 2000 aus WERKENTHIN 2012).

### 2.6.2. Europa

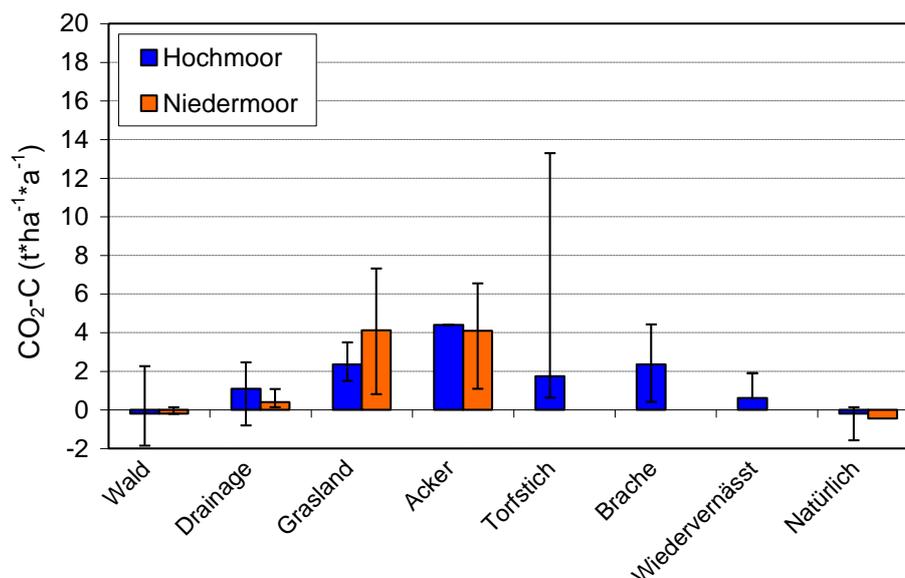
Die Moore Europas nehmen einen Flächenanteil von 5-6 % ein, in denen etwa 42 Gt Kohlenstoff gespeichert sind. Der größte Teil dieser Moore befinden sich im Tiefland der borealen und gemäßigten Breiten, wo die Niederschlagsraten hoch sind und nur eine geringe Evapotranspiration stattfindet. In Europa unterliegen ca. 50 % der Moore einer mehr oder weniger intensiven Landnutzung, die zumeist mit einer starken Entwässerung verbunden ist (DRÖBLER et al. 2008).

Im Rahmen des CarboEurope-Clusters wurden europaweit Messungen von Treibhausgasemissionen aus Mooren zusammengetragen (Abb. 3). Die in Abb. 3 aufgeführten mittleren CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten von Nieder- und Hochmoorböden stammen überwiegend aus Finnland und können nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragen werden (Abb. 3; BYRNE et al. 2004).

So sind die angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die aus ackerbaulich genutzten Niedermooren freigesetzt werden, deutlich geringer als die Daten des IPCC. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Mooren die einer Grünlandnutzung unterliegen, werden hingegen von CarboEurope als deutlich höher eingeschätzt als durch den IPCC (vgl. Abb. 2 & 3).

Da die CO<sub>2</sub>-Emissionswerte der CarboEurope-Studie stark von den Untersuchungsergebnissen der von in Deutschland durchgeführten Studien abweichen, verwendet das Umweltbundesamt (UBA) in seinem Treibhausgasinventarbericht 2010 andere Emissionsfaktoren.

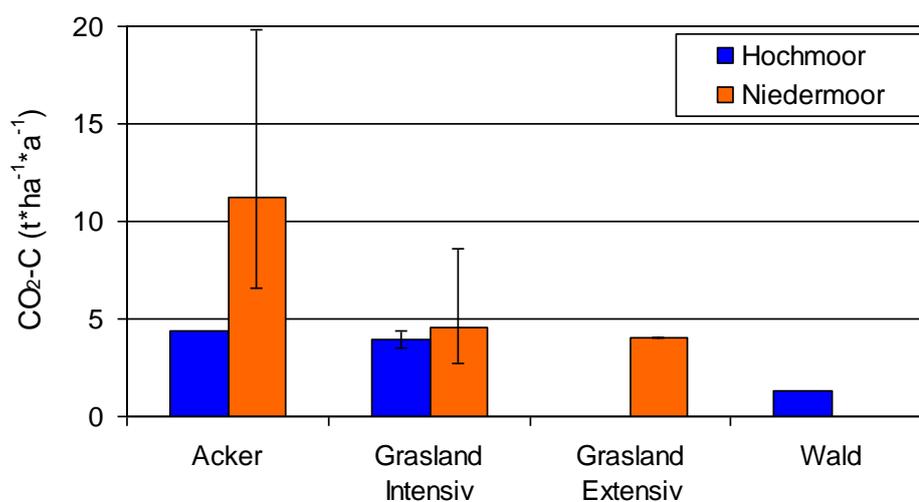
Für die Moorflächen in Deutschland werden Emissionsfaktoren in einem Bereich von 5 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> unter Grünland- und 11 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> unter Ackernutzung angenommen (UBA 2010).



**Abbildung 3:** Jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten in Europa. Die Balken stellen die Streuung der Literaturdaten dar (nach BYRNE et al. 2004 aus DRÖBLER et al. 2008).

### 2.6.3. Gemäßigte Breiten / Deutschland

In Deutschland gibt es ungefähr 14.000 km<sup>2</sup> Moorfläche. In der Region Berlin - Brandenburg befinden sich mit 2223 km<sup>2</sup> ungefähr 15 % der deutschen Moorflächen (COUWENBERG & JOOSTEN 2001). In seinem Bericht zur Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren hat HÖPER (2007) nutzungs- und moortypabhängige CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten für Moore in den gemäßigten Breiten abgeleitet (Abb. 4). Dabei greift HÖPER (2007) im Wesentlichen auf Untersuchungen aus Deutschland, den Niederlanden, Großbritannien, Irland, Südschweden und den nördlichen USA zurück.



**Abbildung 4:** Jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung verschiedener Moortypen und Landnutzungsarten in den gemäßigten Breiten (ohne Osteuropa). Die Fehlerbalken stellen den höchsten und niedrigsten gefundenen Wert in der Literatur dar (nach HÖPER 2007).

Die von HÖPER (2007) angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionen reichen von 1,3 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> aus bewaldeten Hochmoorflächen bis hin zu 11,2 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup> aus ackerbaulich genutzten Niedermoorflächen (Abb. 4). Einen Überblick über die von verschiedenen Autoren ermittelten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten in Deutschland gibt Tab. 1.

Die Freisetzungsraten liegen in einem Bereich zwischen 1,6 und 7 t CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>. Berücksichtigt man Moortyp und Nutzungsart, sind die zusammengestellten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten in Tabelle 1 mit den von HÖPER (2007) und BYRNE et al. (2004) ermittelten Werten vergleichbar.

**Tabelle 1:** CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten aus entwässerten Moorböden in Deutschland

Autoren	Untersuchungsgebiet	Wasserregime/ Nutzung	Messmethode	CO <sub>2</sub> -C-Freisetzung kg*ha <sup>-1</sup> *a <sup>-1</sup>
MUNDEL (1976)	Paulinenaue, Brandenburg; Niedermoor	Grünlandnutzung/ GW 30-120 cm u. GOK	Lysimeterversuche, künstlich geschüttet; Spezielle Aufbaubedingungen	2900-6700
WESSOLEK et al. (1999)	Rhinluch, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW- 30 - 50 cm u. GOK	Massenbilanzierung: Mächtigkeitsverlust (Zeitraum: 22 a)	3080
GENSOR & ZEITZ (1999)	Biesenbrow Brandenburg; Niedermoor	Überstau, intensive Grünlandnutzung, drainiert	CO <sub>2</sub> Flussmessung	0-5600
MEYER et al. (2001)	Dümmer, Niedersachsen; Niedermoor	Grünlandnutzung, drainiert/ GW 57 cm u. GOK	„Geschlossene-Kammer-Methode“, Flussmessungen	4120
RENGER et al. (2002)	Rhinluch, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 30 - 120 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	2800-7000
KLUGE (2003)	Randow-Welse, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 50-120 cm u. GOK	Massenbilanzierung: Mächtigkeitsverlust (Zeitraum: 40 a)	6900
DRÖBLER (2005)	Kendlmühlfilze Bayern; Hochmoor	drainiert/ GW 1117cm u. GOK	„Geschlossene-Kammer-Methode“, Flussmessungen	2250-2460
LORENZ (2008)	Spreewald, Brandenburg; Niedermoor	verschiedene Varianten/ GW 20-110 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	1600-4100
KLUGE et al. (2008)	Randow-Welse, Brandenburg; degradiertes Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 30-80 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	2900-5800

Quelle: aus WERKENTHIN 2012, nach KLUGE et al. 2008. GW = Grundwasserstand, GOK = Geländeoberkante.

### 3. Material und Methoden

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde das numerische Modell HYDRUS 1D weiterentwickelt und mit einem aus Labordaten entstandenen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsmodell erweitert. Dadurch war es möglich, für unterschiedliche Moortypen den Wasser- und Wärmehaushalt zu modellieren und die CO<sub>2</sub>-Freisetzung zu berechnen.

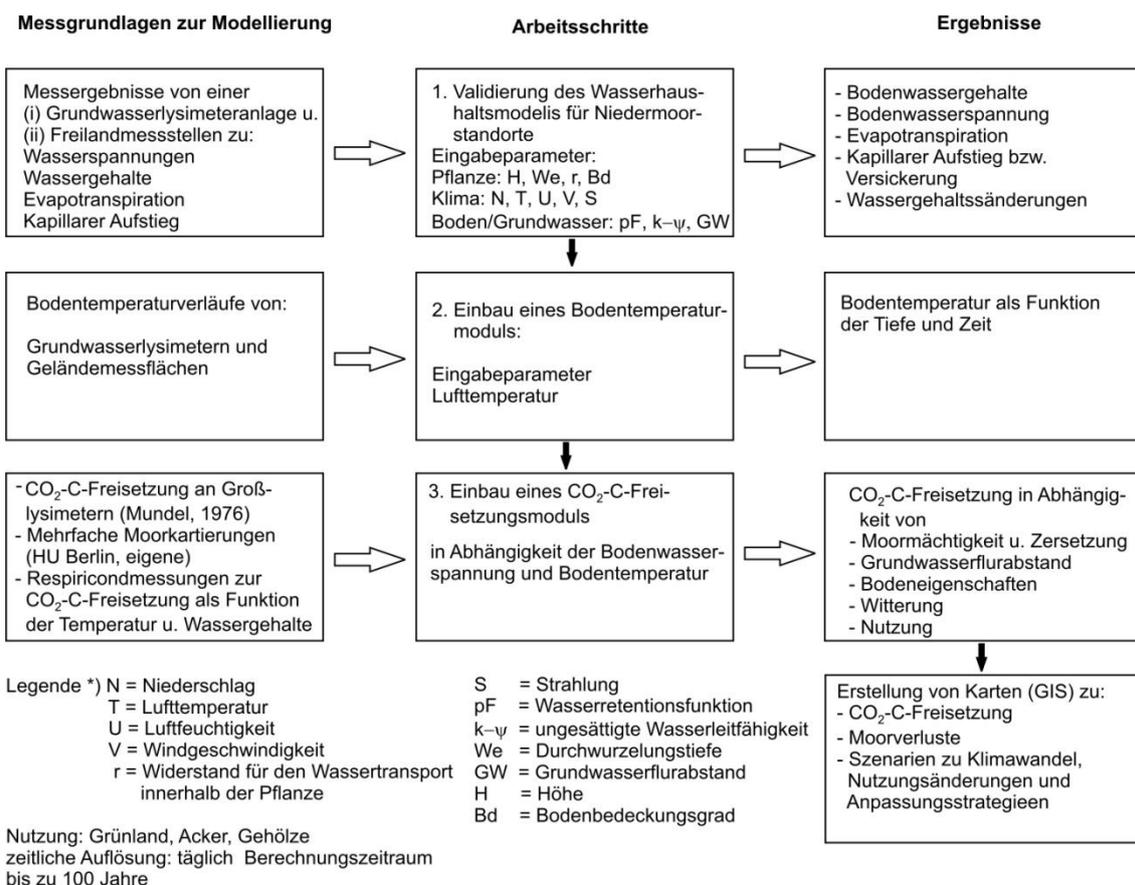
Zur Modellentwicklung und -kalibrierung wurden folgende grundlegenden Untersuchungen und Materialien verwendet:

- langjährige Feldbeobachtungen zur physikalisch-stratigraphischen Veränderung der Moore durch eigene Kartierungen sowie Moorkartierungen aus dem Moorarchiv der Humboldt Universität Berlin
- Lysimetermessungen zum Wasserhaushalt (SCHWÄRZEL 2000) und zu Moorverlusten bzw. CO<sub>2</sub>-Verlusten (MUNDEL 1976)
- Auswertungen von Literaturdaten anderer Arbeitsgruppen (siehe Kap. 2.6, Kap. 5.1)
- Laborversuche an unterschiedlichen Torfen zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung für unterschiedliche Temperatur- und Wassergehaltsbedingungen sowie hydraulische und thermische Substrateigenschaften (WESSOLEK et al. 2002; KLUGE et al. 2008; WERKENTHIN 2012 und Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, Kap 4.2.4).

Nachdem die Modelle mit den o. a. Messungen kalibriert und validiert wurden, erfolgten szenarienbasierte und flächenhafte Berechnungen für die Randow-Welse-Niederung (s. Kap. 6).

Schematisch sind die einzelnen Schritte bzw. Komponenten zur flächenhaften Bewertung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Niedermooren in Abb. 5 dargestellt.

In der linken Spalte der Abb. 5 sind die erforderlichen Messgrundlagen für eine Modellierung des Wasserhaushalts und CO<sub>2</sub>-Freisetzung aufgeführt, in der mittleren Spalte die dafür durchgeführten Arbeitsschritte zur Modellbildung und Modellierung und rechts die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte bis hin zur Erstellung von Karten.



**Abbildung 5:** Vorgehensweise zur flächenhaften Berechnung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung

### 3.1. Probennahme in den Untersuchungsgebieten

Die Torfproben der unterschiedlichen Untersuchungsgebiete wurden an aufgegrabenen Niedermoorprofilen gewonnen. Dazu wurden in verschiedenen Tiefen ungestörte Stechzylinder- und Beutelp Proben entnommen. Die Probennahme in der Randow-Welse-Niederung (RAW) erfolgte am 26.10.2011 in insgesamt vier Tiefen.

Die Proben der Lietzengraben-Niederung (LIETZ) wurden am 08.08.2011 entnommen. Die Entnahmetiefe lag zwischen 20 und 30 cm unter Geländeoberkante (GOK). Die Probennahme in der Bieselfieß-Niederung (BIES) erfolgte am 01.06.2011. Die Entnahmetiefe lag zwischen 20 cm und 60 cm. Die Probe vom Hundekheleffenn (HKF) wurden am 29.08.2011 direkt aus dem Oberboden entnommen.

Die Tabelle 2 zeigt die charakteristischen Merkmale der Untersuchungsgebiete, die Koordinaten der Profile und die Bezeichnung der entnommenen Proben. Die Untersuchungsgebiete sind sowohl Versumpfungs- als auch Verlandungs- und Durchströmungsmoore; entsprechend unterschiedlich sind die Torfsubstrate.

**Tabelle 2:** Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

Untersuchungs- gebiet	UTM Koordinaten	Hydrologisch- genetischer Moortyp	Substrate	Substrat Bezeichnung
Randow-Welse- Niederung	33U 439608 5899097; 440511 5892015; 440651 5891000; 438877 5894079	Versumpfungs-/ Durchströmungs- moor	Seggen- und Schilfmischtorfe  Torf- und Detritusmudden	RAW GM OB RAW MM OB RAW M OB RAW GM UB RAW MM UB RAW M UB
Lietzengraben- Niederung	33U 397926; 5837187	Versumpfungs- moor	Seggen- und Schilftorfe	LIETZ OB
Bieselfließ- Niederung	33U 386333; 5834690	Versumpfungs- moor	Seggen- und Erlentorfe	BIES OB BIES UB
Hundekehlefenn	33U 382106, 5815592	Verlandungs- moor	Seggen- und Schilftorfe	HKF OB

### 3.2. Laboruntersuchungen

#### 3.2.1. Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate (Bodenatmung)

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten der unterschiedlichen Torfe im Labor war ein zentraler Punkt im Rahmen unseres Teilprojektes. Im Folgenden wird auf die einzelnen Arbeitsschritte, die bei der Ermittlung der Respiationsraten der unterschiedlichen Torfe durchgeführt wurden, eingegangen.

#### 3.2.2. Probenaufbereitung

Da der mikrobielle Abbau von Torfen stark von der Temperatur und dem Wassergehalt abhängt (vgl. Kap. 2.4.2 und 2.4.3), wurde die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate unter definierten Bedingungen gemessen. Dies erfolgte bei unterschiedlichen Bodenfeuchten durch Einstellung der Wasserspannung auf keramischen Platten auf pF 1,5, 1,8, pF 2,5 und pF 4 (DIN 19683-5). Die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate wurde insgesamt bei drei, bzw. fünf unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (= Wasserbad) gemessen (5, 10, 15, 20 und 25 °C).

#### 3.2.3. Messprinzip des Inkubationsexperiments

Die Inkubationsexperimente zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung wurden nach DIN ISO 17155 zur Ermittlung der Bodenrespiration durchgeführt. Dabei erfolgte eine quasikontinuierliche Messung der mikrobiellen Bodenatmung mit dem Respirocond der Fa. Nordgrens Innovation.

### 3.3. Weitere Laboruntersuchungen

Zusätzlich wurden die in Tab. 3 aufgeführten Laboranalysen durchgeführt. Die pF-Charakteristik und die Wärmeleitfähigkeit wurden exemplarisch nur für die Proben der Randow-Welse-Niederung sowie die Bieselfließ-Niederung bestimmt.

**Tabelle 3:** Analysemethoden zur Bestimmung der Torfeigenschaften

Parameter	Analysemethode
Trockenrohdichte TRD in g/cm <sup>3</sup>	Trocknung bei 105 bis zur Gewichtskonstanz (DIN ISO 11272)
pF-Charakteristik	Stufenweise Entwässerung der kapillar aufgesättigten Stechzylinder bei pF 1,0; 1,5; 1,8 mit hängender Wassersäule und pF 2,5; 4,2 im Drucktopf (DIN ISO 11274)
Wärmeleitfähigkeit W/m/K	Verdunstungsverfahren- Messung mit Isomet 2140 bei unterschiedlichen Wassergehalten (IEEE. 1996)
Glühverlust	Veraschung der bei 105 getrockneten Proben bei 550 über 6 Stunden (DIN 19684-3)
C und N Gehalte	Gaschromatographische Bestimmung (DIN ISO 10694)
Partikeldichte g/cm <sup>3</sup>	Bestimmung im Heliumpyknometer (DIN 66137-2)

### 3.4. Numerische Modellierung mit HYDRUS 1D

HYDRUS 1D ist ein numerisches Simulationsprogramm, mit dem der vertikale Wasser-, Wärme- und Stofffluss in gesättigten und ungesättigten porösen Medien berechnet werden kann. Um den Wassertransport zu berechnen, löst das Programm die Richards-Gleichung, numerisch.

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad [1]$$

mit:  $\theta$  - volumetrischer Wassergehalt (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>); t - Zeit (s); z - vertikale Koordinate (m); h - Matrixpotential (m); K - hydraulische Leitfähigkeit (m/s)

Dazu müssen zusätzlich die Anfangs- und Randbedingungen bekannt sein bzw. definiert werden. Optional kann Gleichung [1] noch um einen Senkenterm ergänzt werden, der z.B. die Entnahme von Wasser durch Pflanzenwurzeln berücksichtigt. Zur Simulation des vertikal eindimensionalen Wärmeflusses verwendet HYDRUS 1D die Konvektions-Dispersionsgleichung [2].

$$C_p(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w \theta \frac{\partial T}{\partial z} \quad [2]$$

mit: T - Temperatur (K);  $\lambda(\theta)$  – Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (W/m/K);  $C_p$  - volumetrische Wärmekapazität des porösen Mediums (J/m<sup>3</sup>/K)  $C_w$  - volumetrische Wärmekapazität der flüssigen Phase (J/m<sup>3</sup>/K);

Weitere und ausführliche Informationen über die hydrologischen und thermischen Modelle, die HYDRUS 1D zugrunde liegen, finden sich in ŠIMUNEK et al. (2008).

#### 3.4.1. Eingabeparameter HYDRUS 1D

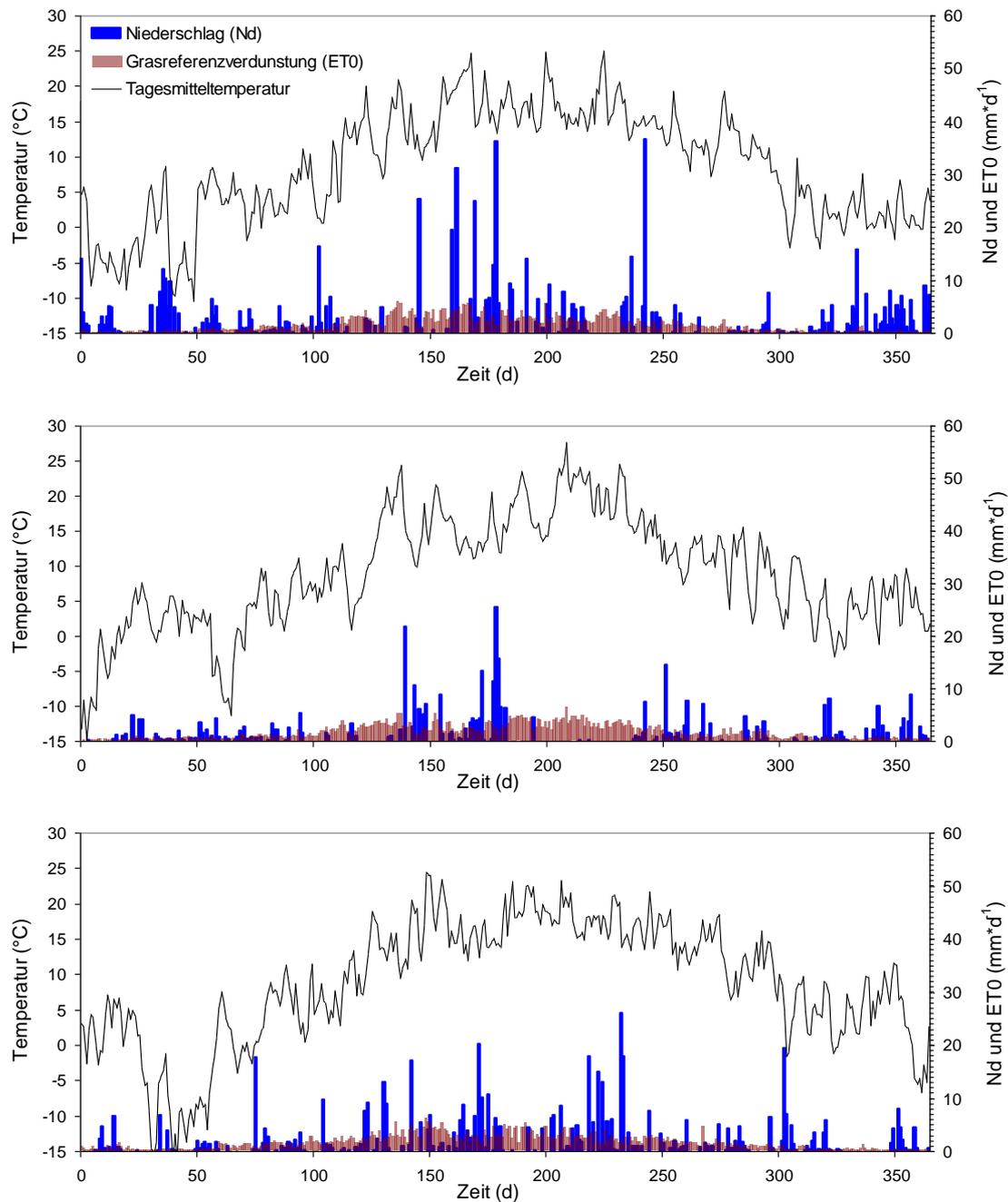
Um mit HYDRUS 1D den Bodenwasser- und Temperaturhaushalt abzubilden, müssen neben den ermittelten Bodeneigenschaften (siehe Kap. 3.2) auch Rand- und Anfangsbedingungen vorgegeben werden. Weiterhin werden Horizontmächtigkeit und Durchwurzelungstiefe benötigt

Die Modelleingabeparameter sowie Randbedingungen sind in Tab. 4 aufgelistet. Die verwendeten meteorologischen Reihen stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und wurden an der Messstelle Zehdenick aufgenommen. Diese Station wurde deshalb ausgewählt, da für diese Station Klimareihen über 50 Jahre sowie Klimamodellierungen bis 2050 des PIK (POTSDAMER INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG) vorlagen. Der Abstand zwischen der Station Zehdenick und der Messstation beträgt etwa 39 Kilometer Luftlinie. Im langjährigen Mittel unterscheiden sich die Jahresniederschläge um weniger als 10 mm\*a<sup>-1</sup>, die mittlere Jahrestemperatur ist mit 8,3° C ungefähr gleich hoch. Die FAO-Grasreferenzverdunstung (ET<sub>0</sub>) wurde nach ALLEN et al. 1998 berechnet. Die zur Modellierung mit HYDRUS 1D verwendeten Klimareihen sind graphisch in Abb. 6 dargestellt.

**Tabelle 4:** Annahmen und Eingabeparameter für die Modellstudien mit HYDRUS 1D

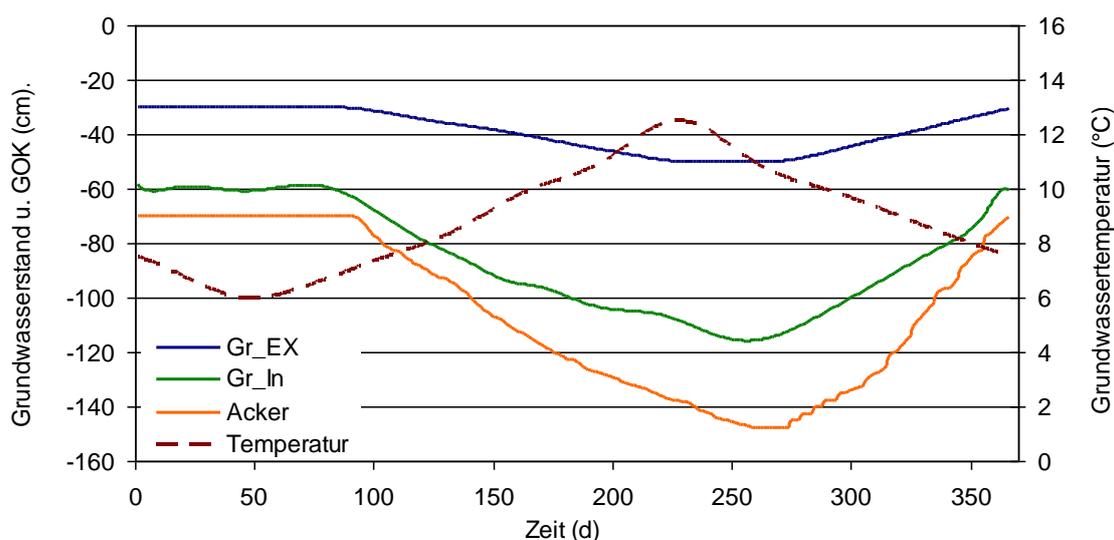
Annahmen		Modell Eingabeparameter
Klima	Warm-Trockenes Jahr	Nd: 384 mm; Temp Ø 9,0° C ; ET0 605 mm
	Kalt-Feuchtes Jahr	Nd: 730 mm; Temp Ø 8,5° C; ET0 566 mm
	Durchschnittl. Jahr	Nd: 560 mm; Temp Ø 8,8 ° C; ET0 573 mm
Grundwasser	Konstant für folgende Tiefen	10, 30, 60, 90, 120 cm u. GOK  Grünland Exensiv 30 -50 cm; Ø 39 cm u. GOK
	Schwankend	Grünland Intensiv 60 - 115 cm; Ø 85 cm u. GOK Ackernutzung 70 - 147 cm; Ø 105 cm u. GOK
	Temperatur	100 cm u. GOK: 6° C - 12,5° C ; Ø = 8,8° C
Vegetation	Grünland Acker	FEDDES-Parameter (1976) für Gras FEDDES-Parameter (1976) für Mais/Weizen
Durchwurzelung	Grünland	Gleichmäßige Wurzelverteilung Durchwurzelungstiefe: 25 cm
	Acker	Gleichmäßige Wurzelverteilung Durchwurzelungstiefe: 40 cm
Horizonte	Oberboden	Substrate: RAW GM;MM;M und BIES OB Mächtigkeit: 45 cm
	Unterboden	Substrate: RAW GM;MM;M und BIES UB Mächtigkeit: 55 cm
Hydraulische Eigenschaften	Oberboden	Siehe Tab. 8
	Unterboden	Siehe Tab. 8
Thermische Eigenschaften	Oberboden	Siehe Tab.10
	Unterboden	Siehe Tab. 10
CO <sub>2</sub> -Funktionen	Temperatur	Zeitliche Auflösung: täglich Räumliche Auflösung: alle 10 cm  T ≤ 0° C → CO <sub>2</sub> -Freisetzung= 0
	Wasserspannung	pF ≤ 0 → CO <sub>2</sub> -Freisetzung= 0

Nd = Niederschlag; Temp = Temperatur; u. GOK = unter Geländeoberkante; RAW = Randow-Welse-Torfe; BIES = Bieselfieß-Torfe; OB = Oberboden; UB = Unterboden; GM =geringmächtig; MM = mittelmächtig; M = mächtig.



**Abbildung 6:** Mittlere Tagesniederschläge und Temperaturen eines kalt-feuchten, warm-trockenen und durchschnittlichen Jahres, gemessen an der Klimastation Zehdenick sowie die nach ALLEN et al. (1998) berechnete FAO-Grasreferenzverdunstung (ET<sub>0</sub>).

Die durchschnittlichen Jahreswerte bzw. die Jahressummen der abgebildeten Klimareihen sind in Tab. 4 aufgeführt. Die GW-Amplituden für die Modellszenarien wurden anhand von Messungen von SCHWÄRZEL et al. (2006), HÖLL (2007) und OLESZCZUK et al. (2008) zusammengestellt (Abb. 11).



**Abbildung 7:** Exemplarische Grundwasseramplituden bei verschiedenen Nutzungsformen und Grundwassertemperatur (gestrichelte Linie) in einem Meter Tiefe während eines Kalenderjahres. Gr\_Ex = extensive Grünlandnutzung; Gr\_In = intensive Grünlandnutzung; Acker = intensive landwirtschaftliche Nutzung; Temperatur = Grundwassertemperatur

Verschiedene Landnutzungsformen erfordern eine unterschiedlich starke Entwässerungstiefe. Die Amplituden der Grundwasserganglinien unterscheiden sich daher bei den gewählten Nutzungsszenarien (Abb. 7). Der abgebildete Grundwassertemperaturverlauf in einem Meter Bodentiefe ist an Informationen aus dem BERLINER UMWELTATLAS (2011) sowie Messungen zu Boden- und Grundwassertemperaturen in Niedermooren von HÖLL (2007) angelehnt.

### 3.4.2. Berechnung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung

Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung der unterschiedlichen Niedermoorstandorte wurde mit Hilfe der Modellergebnisse (HYDRUS 1D) und den aus Laborversuchen gewonnenen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen (Kap. 4.2.5) berechnet. Die Gesamtsumme der CO<sub>2</sub>-Freisetzung eines Moorprofils setzt sich hierbei aus den Freisetzungsraten verschiedener Tiefen zusammen. Das Moorprofil (1 m) wurde dazu in 10 cm mächtige Rechenschichten unterteilt. Für diese Schichten wurde die entsprechende Bodentemperatur und -feuchte auf täglicher Basis berechnet. Im Anschluss erfolgte eine Modellkopplung mit den profilspezifischen, nichtlinearen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen der jeweiligen Horizonte.

### 3.5. Erstellung einer aktuellen Moormächtigkeitkarte Randow-Welse-Niederung

Für die Randow-Welse-Niederung wurden für verschiedene Zeitabschnitte GIS-basierte Moormächtigkeitkarten erstellt.

Dafür wurden ca. 6500 Profildaten der Jahre 1963/64 des Instituts für Moorbodenforschung Paulinenaue (HUB Moorarchiv) ausgewertet und vom Gauss-Krüger Koordinatensystem in das Universal Transverse Mercator System (UTM, Streifen 33) übertragen. Anschließend wurden die Daten in ein Geoinformationssystem (ArcGIS 10) überführt. Anhand geostatistischer Analysetools erfolgten die Abgrenzung von Moormächtigkeitbereichen und die räumliche Interpolation (RICHTER 2013).

Die Daten der Moormächtigkeiten der Jahre 1963/64 des HUB Moorarchivs konnten für eine aktuelle Moormächtigkeitbewertung nicht verwendet werden, da sich die Mächtigkeiten innerhalb der letzten fünfzig Jahre aufgrund von Moorsackung und Mineralisierung stark verändert haben. Daher wurde eine aktualisierte Mächtigkeitkarte 2012 erstellt. Dies erfolgte anhand der von KLUGE et al. (2008) erfassten Mächtigkeitabnahmen an 83 Profilpunkten in der Randow-Welse-Niederung. Diese Daten ließen eine Differenzierung verschiedener Mächtigkeitabnahmen bei unterschiedlichen Entwässerungs- bzw. Moorsackungs- und Mineralisierungsstadien zu. Unter der Verwendung der Abnahmefunktionen für einzelne Zeitabschnitte und der GIS-basierten Interpolationsverfahren wurden Mächtigkeitabnahmen für alle Profipunkte flächenscharf berechnet und abgegrenzt (RICHTER 2013; siehe Tab. 4 und Tab. 5).

### 3.6. GIS-basierte Szenarienbildung

#### 3.6.1. Moormächtigkeit

Für die Fläche der Randow-Welse-Niederung wurden Szenarien für Moormächtigkeitabnahmen bis zum Jahr 2060 erstellt. Bei diesen Szenarien wurden sektorale Abnahmen bestimmt. Sektorale Abnahme bedeutet, dass es aufgrund verschiedener Moormächtigkeiten zu unterschiedlich starken Abnahmen kommt.

Tiefere Grundwasserstände bei intensiver Nutzung resultieren in stärkeren Abnahmen innerhalb der mächtigeren Moorbereiche; extensive Nutzung mit höheren Grundwasserständen führen dagegen zu ähnlichen Moormächtigkeitabnahmen in allen Mächtigkeitbereichen.

Die dafür ausgewerteten Daten sind den Arbeiten von LEHRKAMP (1987), KLUGE (2003) und KLUGE et al. (2008) entnommen, welche auf der intensiv untersuchten Fläche Wendemark in der Randow-Welse-Niederung aufgenommen wurden (RICHTER 2013).

Die Tab. 5 zeigt die mittleren Mächtigkeitabnahmen innerhalb der verschiedenen Moormächtigkeitbereiche, die Tab. 6 die sektoralen Moormächtigkeitabnahmen für verschiedene Zeitabschnitte mit unterschiedlicher Landnutzung.

Für die Moore mit Mächtigkeiten >50 dm wurden die Daten linear interpoliert, da keine Aufnahmedaten vorlagen. Dem dargestellten Szenario 2060 liegen die mittleren

Moormächtigkeitsabnahmen der Fläche Wendemark in der Periode 2003 - 2012 mit extensiver Grünlandnutzung bei einem mittleren Grundwasserflurabstand von ca. 60 cm zugrunde (Tab. 6).

**Tabelle 5:** Gemessene Gesamtabnahmen auf der Fläche Wendemark und mittlere Mächtigkeitsabnahmen in den Moormächtigkeitsbereichen > 3 - 20 dm (1963 - 2003) und hypothetische Annahmen für die Bereiche < 20 - < 50 dm (nach LEHRKAMP 1987, KLUGE 2003 aus RICHTER 2013).

Moormächtigkeitsbereich (dm)	> 3 - 8	> 8 - 12	> 12 -20	> 20 -50	> 50
Gesamtabnahmen 1963 -2003 (dm)	2.4	3.2	5.1	7.11	12.33
Mittlere jährliche Abnahmen (dm*a <sup>-1</sup> )	0.06	0.08	0.13	0.18	0.31

**Tabelle 6:** Abgeleitete sektorale Mächtigkeitsabnahmen in verschiedenen Zeitabschnitten mit unterschiedlicher Landnutzung in den Moormächtigkeitsbereichen > 3 - 20 dm (1963 - 2003) und hypothetische Abnahmen für die Bereiche < 20 - < 50 dm (1963 - 2060) sowie > 3 - 20 dm für die Jahre 2012 - 2060 (nach LEHRKAMP 1987, KLUGE 2003 und RICHTER 2013).

Moormächtigkeitsbereich (dm)	> 3 - 8	8 - 12	> 12 - 20	20 - 50	> 50
1963 - 1981	1.08	1.44	2.34	3.24	5.58
1981 - 2003	1.32	1.76	2.86	3.96	6.82
2003 - 2012	0.54	0.72	1.17	1.62	2.79
2012 - 2060	2.88	3.84	6.24	8.64	14.88
1963 - 2060	5.82	7.76	12.61	17.46	30.07

### 3.6.2. CO<sub>2</sub>-Freisetzung Randow-Welse-Niederung

Mit Hilfe der aus den Messdaten abgeleiteten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen (Kap. 5.2), der aktualisierten Moormächtigkeitskarte 2012 (Kap. 4.1), Landnutzungsdaten und Grundwasserständen nach ELLMANN und SCHULZE (2002) (siehe Anhang A2-A5) wurden zwei verschiedene Szenarien zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung in der Randow-Welse-Niederung berechnet. Dies erfolgte durch die Abgrenzung verschiedener Moormächtigkeitsbereiche (siehe 3.6.1) über insgesamt 6500 Punktdaten.

Hierzu wurden die Punktdaten über die geostatistische Methode „natural neighbour“ interpoliert und anschließend in Moormächtigkeitsverlustklassen zusammengeführt (vgl. RICHTER 2013).

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Aktuelle GIS-basierte Moormächtigkeitkarte Randow-Welse-Niederung

Abb. 8 zeigt die digitalisierte Moormächtigkeitkarte der Randow-Welse-Niederung im Jahr 1964; Abb. 9 im Vergleich dazu die aktuelle Moormächtigkeitkarte 2012 für die Randow-Welse-Niederung sowie für die Referenzfläche Wendemark (umrandet). Im Vergleich zu den Moormächtigkeiten von 1964 (Abb. 8; 13) zeigt sich eine deutliche Abnahme der Moormächtigkeitsbereiche auf der Gesamtfläche der Randow-Welse-Niederung.

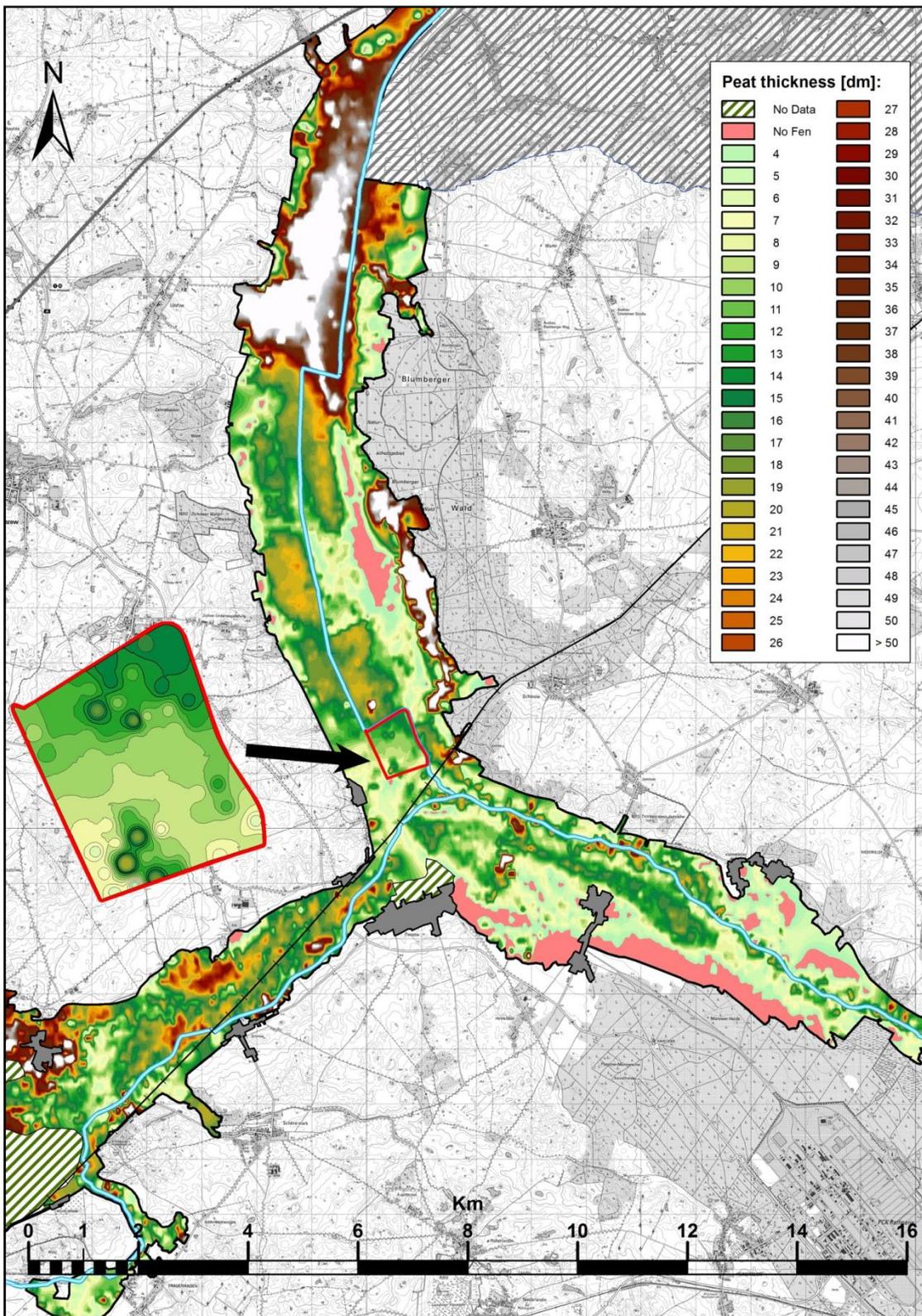
Die berechneten Moormächtigkeiten wurden mit Mächtigkeitsaufnahmen aus Profil- und Bohrstockkartierungen aus den Jahren 2000 - 2012 verglichen (Tab. 7). Der Vergleich zeigt vor allem für die Aufnahmepunkte in der nördlichen Randow-Welse-Niederung (WALLOR HUB 2012; siehe Abb. 9) gute Übereinstimmungen.

**Tabelle 7:** Vergleich der berechneten Moormächtigkeit der Moormächtigkeitkarte 2012 mit verschiedenen Geländeaufnahmen (sektorale Abnahmen)

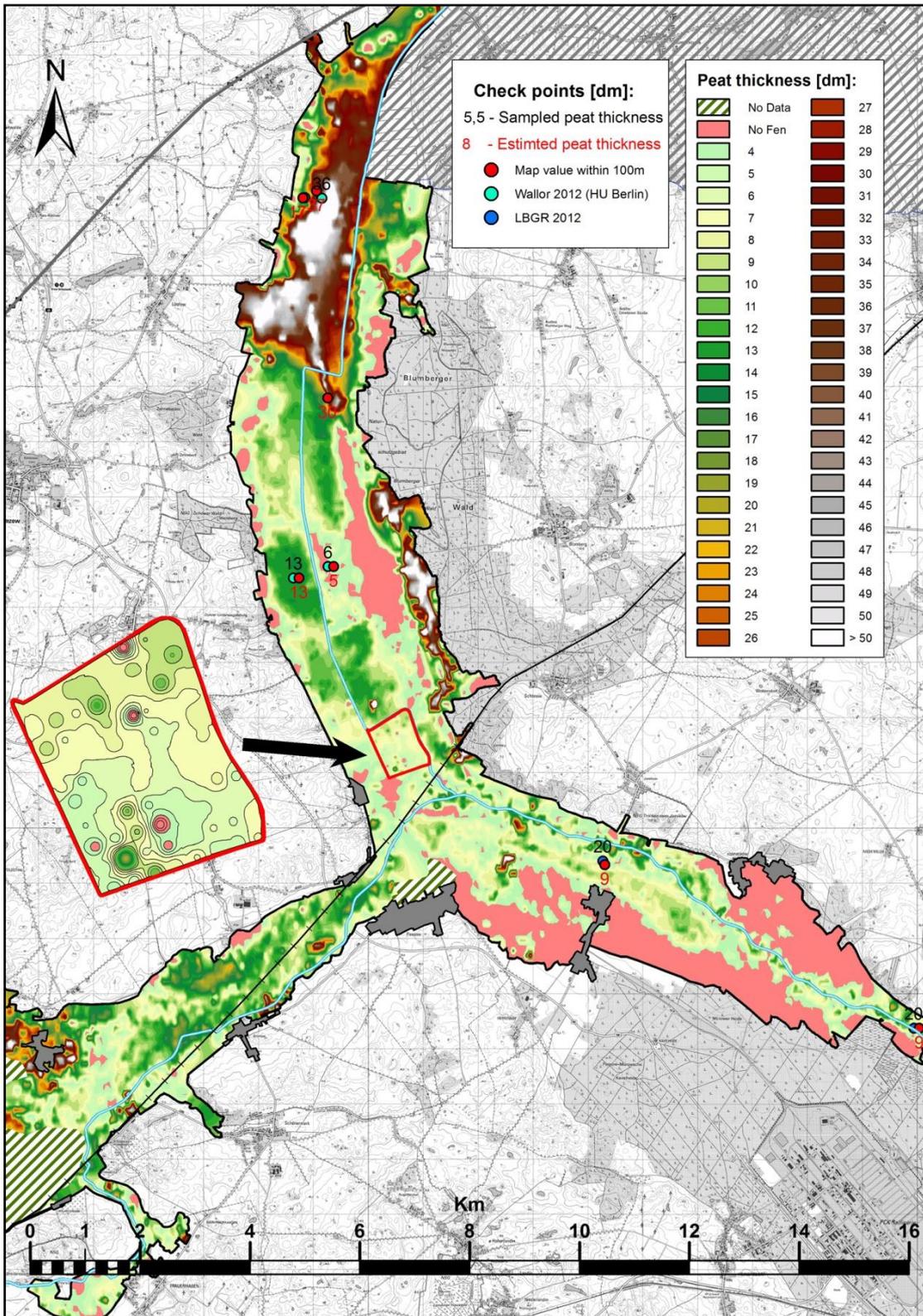
Nr.	Profil Nr.	Moormächtigkeit [dm]		Abweichung [dm]	Standard Abweichung	Quelle
		Karte	Bohrpunkt			
1	GP 2	13	13	0	0.00	WALLOR 2012 (HUB)
2	GP 5	6	5	-1	0.71	
3	S 1	17.5	17	-0.5	0.35	
4	S-P2	36	37	1	0.71	
5	2410675	20	9	-11	7.78	LBGR 2012
6	2410673	20	9	-11	7.78	

Es treten aber erhebliche Abweichungen zu den Aufnahmepunkten des LBGR 2012 auf; dies könnte folgende Gründe haben:

- 1) Aufnahmeraster von 100m x 100m der Altdaten (1964), welches zu ungenauer Interpolation der Moormächtigkeit führt,
- 2) Fehler bei der Digitalisierung und Projektion von Gauß-Krüger zu UTM-Koordinaten,
- 3) Übertragbarkeit der Abnahmen der Wendemarkfläche ist nicht auf alle Flächenbereiche der Randow-Welse-Niederung anwendbar.



**Abbildung 8:** Digitalisierte Moormächtigkeitskarte der Randow-Welse-Niederung 1964 und der Referenzfläche Wendemark= umrahmte Fläche im Bild links (RICHTER 2013). Kartengrundlage: DTK 25/LGB 2012; Moormächtigkeiten: INSTITUT FÜR MOORBODENFORSCHUNG PAULINENAUE/HUB MOORARCHIV, KLUGE 2003 (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



**Abbildung 9:** Aktualisierte Moormächtigkeitskarte der Randow-Welse-Niederung 2012 und der Referenzfläche Wendemark 2012= umrahmte Fläche im Bild links. Kartengrundlage: DTK 25/ LGB 2012, HUB MOORARCHIV, Moormächtigkeiten berechnet n. KLUGE et al. 2008, Kontrollpunkte: LBGR 2012, HUB 2012 und eigene Aufnahmen 2012 (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).

Die neu erstellte Karte zu den Moormächtigkeiten in der Randow-Welse-Niederung bildet die Grundlage für die Bewertung der aktuellen sowie zukünftigen Landnutzung.

## 4.2. Laborergebnisse

### 4.2.1. Bodenphysikalische Eigenschaften

An den im Gelände entnommenen Torfen und Mudden wurden im Labor Trockenrohdichte (TRD), Partikeldichte, Gesamtporenvolumen (GPV) und die Wasserretention bei unterschiedlichen pF - Stufen bestimmt. Die bodenphysikalischen Eigenschaften der untersuchten Torfe sind in Tab. 8 dargestellt.

**Tabelle 8:** Bodenphysikalische Eigenschaften der Torfsubstrate

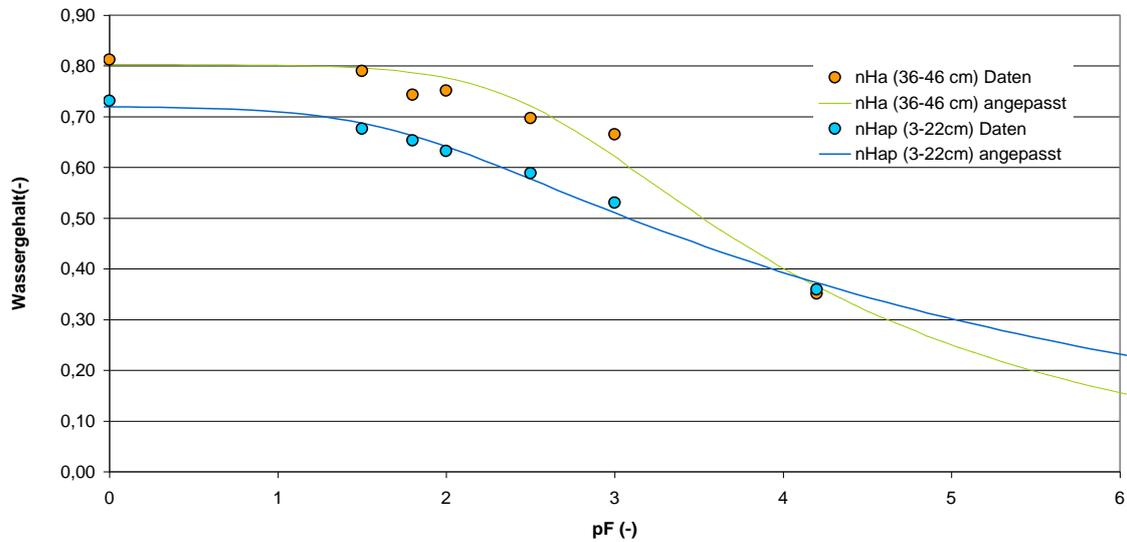
Substrat	TRD	Partikel- dichte	GPV	Wassergehalt bei pF [Vol %]					
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[Vol. %]	1.5	1.8	2.0	2.5	3.0	4.2
RAW MM OB	0.53	1.97	73.1	67.6	65.3	63.2	58.8	53.0	35.9
RAW MM UB	0.24	1.92	82.1	79.0	75.1	74.3	69.7	66.5	35.1
RAW GM OB	0.63	1.78	75.6	69.2	64.7	59.9	51.9	47.3	32.8
RAW GM UB	0.47	1.77	73.3	69.2	65.1	60.7	52.4	49.6	41.9
RAW M OB	0.49	1.89	71.8	65.2	62.5	58.5	50.1	44.8	36.0
RAW M UB	0.36	1.88	82.8	74.5	73.1	71.1	66.5	62.2	27.4
LIETZ	0.36	1.78	80.1	79.7	-	73.7	-	50.9	-
BIES OB	0.29	1.97	85.0	81.0	79.5	76.7	71.2	54.6	31.1
BIES UB	0.12	1.48	9.3	88.7	87.8	84.5	79.0	56.7	20.3

RAW = Randow-Welse-Niederung; LIETZ = Lietzengraben; BIES = Bieselfließ-Niederung;

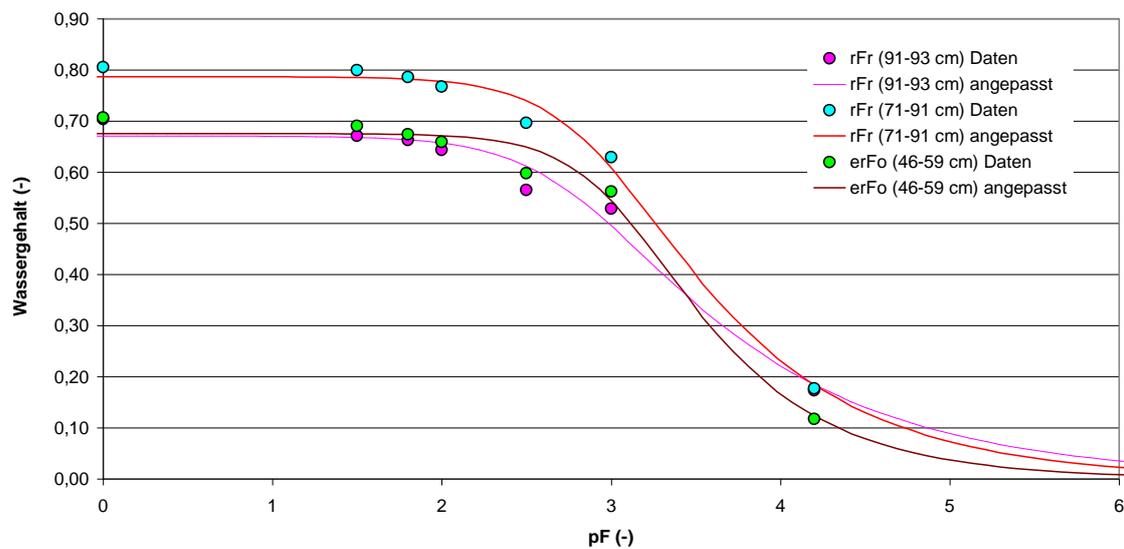
MM = mittelmächtig; GM = geringmächtig; M = Mächtig; OB = Oberboden; UB = Unterboden.

Die Wasserretentionsfunktion und die Wasserleitfähigkeit der Torfe wurden mit Hilfe der Software Shyppit (DURNER & PETERS 2009) nach dem Modell von VAN GENUCHTEN (1980) berechnet. Hierfür konnten die von SCHWÄRZEL et al. 2002 gemessenen Werte der hydraulischen Leitfähigkeiten von gering zersetzten und vererdeten Torfen des Rhinluchs zur Parametrisierung der Wasserleitfähigkeitsfunktion gut verwendet werden. Die parametrisierten Wasserretentionsfunktionen für die Mude- und Torf-

horizonte sowie die im Labor ermittelten Messwerte des Profils Randow-Welse Mittelmächtig (RAW MM) sind in Abb. 10 und Abb. 11 dargestellt.



**Abbildung 10:** Gemessener Wassergehalt bei verschiedenen pF- Stufen und angepasste Wasserretentionsfunktion der Torfe RAW MM; nHa = Niedermoorhorizont; nHap = gepflügter Niedermoorhorizont.



**Abbildung 11:** Gemessener Wassergehalt bei verschiedenen pF- Stufen und angepasste Wasserretentionsfunktion der Mudden RAW MM; rFr = Torfmudde mit Pflanzenresten; erFo = humose Detritusmudde.

Die Kurvenverläufe der angepassten Wasserretentionsfunktionen der unterschiedlichen Torf- und Muddehorizonte bilden die Wassergehalte bei verschiedenen pF-Stufen gut ab.

#### 4.2.2. Bodenchemische Eigenschaften

Die Ergebnisse der bodenchemischen Analyse der Torfproben sind in Tab. 9 aufgeführt. Das Verhältnis von  $C_{org}$  zu Glühverlust (GV) lag bei den untersuchten Torfen zwischen 1.62 und 2.3. In der Literatur wird ein Verhältnis von 1.72 bis 2 angegeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998, KUNTZE et al. 1988). Die LIETZ-Probe hatte mit 1.62 das niedrigste Verhältnis von  $C_{org}$  zu GV. Eine Ursache könnten organische Rückstände aus der Zeit des Rieselfeldbetriebes sein.

**Tabelle 9:** Bodenchemische Analysedaten und Partikeldicke der Torfsubstrate.

Substrat	$C_{org}$	GV	C/N
	Masse %		
RAW MM OB	24.5	51.5	10.4
RAW MM UB	26.1	46.7	20.7
RAW GM OB	34.8	64.5	13.2
RAW GM UB	14.9	25.8	21.4
RAW M OB	23.5	53.6	9.9
RAW M UB	34.5	63.1	20.1
LIETZ	40.1	65.2	15.1
BIES OB	23.8	43.7	10.8
BIES UB	50.9	90.7	17.6

RAW = Randow-Welse-Niederung; LIETZ = Lietzengraben; BIES = Bieselfließ-Niederung

MM = mittelmächtig; GM = geringmächtig; M = Mächtig; OB = Oberboden; UB = Unterboden

#### 4.2.3. Thermische Eigenschaften

Mit dem ISOMET Verdunstungsverfahren nach IEE 442 (1998) (vgl. TRINKS 2010) wurden die Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Torfes bestimmt (Tab. 10). Die Wärmeleitfähigkeiten weisen eine starke Abhängigkeit vom Wassergehalt der Torfe auf. Mit sinkendem Wassergehalt nimmt die Wärmeleitfähigkeit ab.

**Tabelle 10:** Wärmeleitfähigkeit der Torfsubstrate BIES und RAW bei verschiedenen Wassergehalten

Substrat	Wärmeleitfähigkeit ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )					
	Wassergehalt (Vol %)					
	0	10	30	50	70	80
<b>BIES OB</b>	0.06	0.15	0.27	0.37	0.51	0.54
<b>BIES UB</b>	0.07	0.20	0.30	0.41	0.50	0.53
<b>RAW MM OB</b>	0.04	0.12	0.16	0.25	0.38	0.41
<b>RAW MM UB</b>	0.06	0.16	0.22	0.32	0.43	0.48

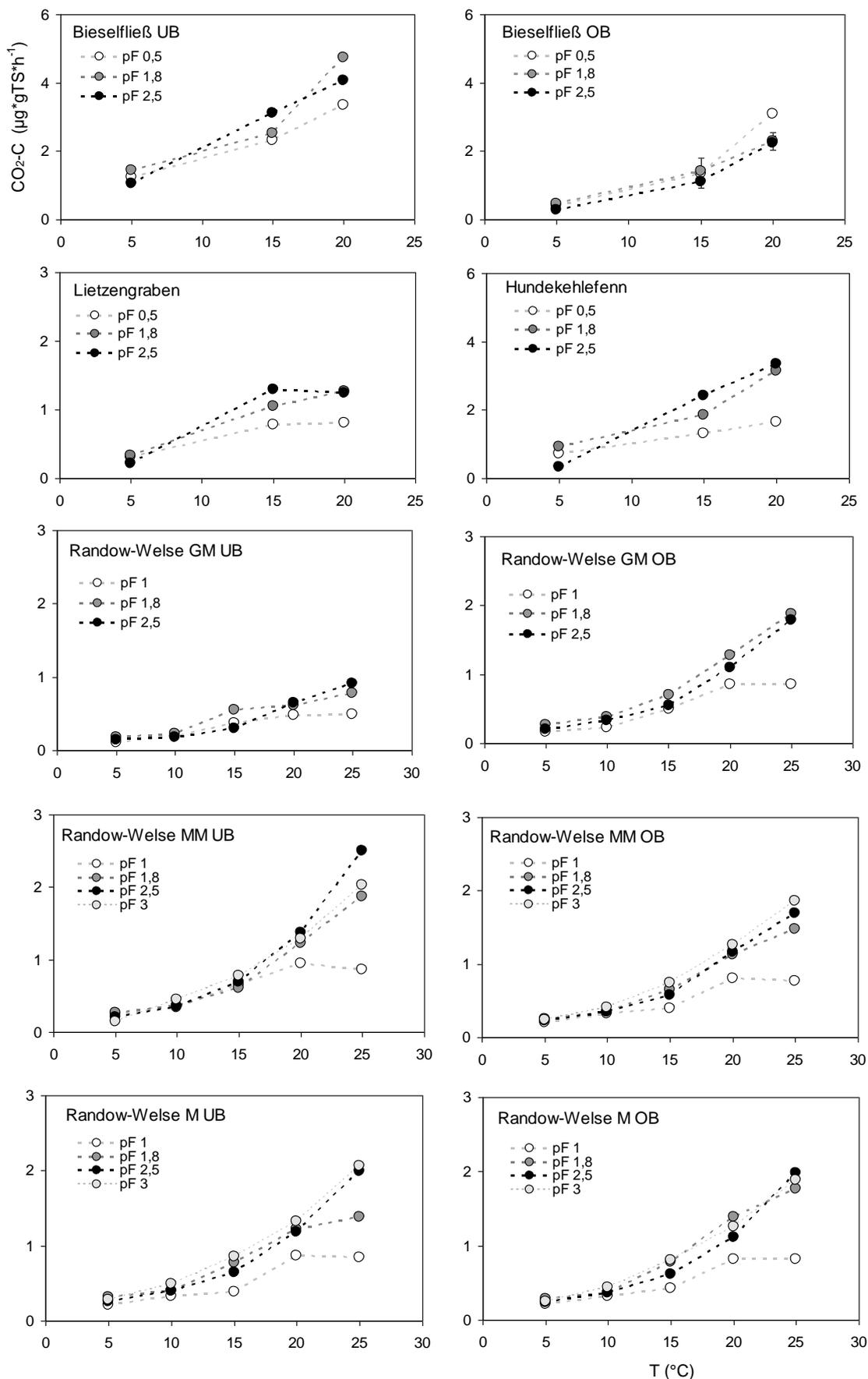
RAW = Randow-Welse-Niederung; BIES = Bieselfließ-Niederung; MM = mittelmächtig;  
OB = Oberboden; UB = Unterboden

#### 4.2.4. CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten der Torfe

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben haben die Temperatur und die Feuchte des Bodens einen wesentlichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten. Im Allgemeinen verbessern sich mit steigender Temperatur, bei ausreichender Feuchte und Sauerstoffverfügbarkeit, die Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen und die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten steigt an. Um diesen Einfluss näher zu beschreiben, wurde die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten der Torfe für unterschiedliche Feuchte- und Temperaturstufen bestimmt.

In Abb. 12 sind die Ergebnisse zum Einfluss der Inkubationstemperatur auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung dargestellt. Ein Anstieg der Inkubationstemperatur hatte bei allen Torfen eine Zunahme der Freisetzungsraten zur Folge.

Vergleicht man die CO<sub>2</sub>-Raten der verschiedenen Torfe untereinander wird deutlich, dass es selbst bei gleicher Temperatur und pH-Stufe erhebliche Unterschiede gibt. Bei einer Inkubationstemperatur von 20° C sind die Differenzen der CO<sub>2</sub>-Freisetzung deutlich größer (0.8 bis 7.8 µg CO<sub>2</sub>-C pro g Trockensubstanz pro Stunde ( $g^{-1}TS \cdot h^{-1}$ )) als bei einer Temperatur von 5° C (0.2 bis 1.4 µg CO<sub>2</sub>-C  $g^{-1}TS \cdot h^{-1}$ ). Die geringsten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten wies der Torf des Lietzengrabens (LIETZ) auf (0.2 µg CO<sub>2</sub>-C  $g^{-1}TS \cdot h^{-1}$  (5° C; pH 2.5) bis 1.3 µg CO<sub>2</sub>-C  $g^{-1}TS \cdot h^{-1}$  (20° C; pH 2.5)). Im Vergleich zu den anderen untersuchten Substraten erhöhte sich die CO<sub>2</sub>-Freisetzung des LIETZ-Torfes bei einer Erhöhung der Inkubationstemperatur von 15 auf 20 nicht.



**Abbildung 12:** Mittlere CO<sub>2</sub>-Freisetzung verschiedener Torfsubstrate in Abhängigkeit von Inkubationstemperatur und pF-Stufe.

Ein Grund für die vergleichsweise niedrige Freisetzungsrates ist möglicherweise der sehr hohe Zersetzungsgrad der Torfproben (H 10). Bei stark zersetzten Torfen ist bereits ein Teil der organischen Substanz von Mikroorganismen abgebaut. Die den Mikroorganismen zur Verfügung stehende Kohlenstoffquelle ist demnach schwerer verfügbar, was in der Regel zu einer niedrigeren  $\text{CO}_2$ -Freisetzung führt.

Ähnliches zeigt sich auch bei den Randow-Welse-Torfen (RAW) aus dem Oberboden mit vergleichbarer Zersetzungsstufe (H 10), die ähnliche  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates aufweisen ( $0.2 \mu\text{g CO}_2\text{-C gTS}^*\text{h}^{-1}$  ( $5^\circ \text{C}$ ; pF 2.5) bis  $1.2 \mu\text{g CO}_2\text{-C gTS}^*\text{h}^{-1}$  ( $20^\circ \text{C}$ ; pF 2.5)). Im Gegensatz zum LIETZ-Torf nimmt die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung bei den RAW-Torfen bei einem Anstieg der Inkubationstemperatur von  $15^\circ \text{C}$  auf  $20^\circ \text{C}$  jedoch zu (Abb. 12).

Die Bieselfließ-Torfe des Oberbodens (BFOB) sind ebenfalls stark zersetzt (H8 – H9). Sie zeigen bei  $20^\circ \text{C}$  jedoch eine höhere  $\text{CO}_2$ -Freisetzung ( $2.2 \mu\text{g CO}_2\text{-C gTS}^*\text{h}^{-1}$  ( $20^\circ \text{C}$ ; pF 2.5)) als die LIETZ- und RAW-Torfe.

Insgesamt bestätigen die Messergebnisse den bekannten, positiven Zusammenhang zwischen der Bodentemperatur und der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung (MUNDEL 1976; WESSOLEK et al. 2002, REICHSTEIN et al. 2003, KLUGE et al. 2008, BERGLUND et al. 2008). Die gemessenen  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der verschiedenen Torfe sind mit Werten aus der Literatur sehr gut vergleichbar. Die relativ großen Unterschiede in der  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der untersuchten Torfe (bei gleicher pF-Stufe und Temperatur) lassen sich auf die unterschiedlichen Ausgangssubstrate sowie auf die verschiedenen Zersetzungsstufen der Torfe zurückführen.

Die Ergebnisse von Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes auf die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates sind sehr unterschiedlich. Bei Freilandmessungen zeigen die meisten Studien, dass der Grundwasserspiegel und somit die Wasserspannung im Torf, eine maßgebliche Rolle bei der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung spielt (MUNDEL 1976, AUGUSTIN 2001; WESSOLEK et al. 1999, PARISH et al. 2008). LAFLEUR et al. (2005) hingegen haben bei ihren Untersuchungen in einem kanadischen Hochmoor gezeigt, dass die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates aus dem untersuchten Moor weitgehend unabhängig vom Grundwasserstand ist.

Laboruntersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes auf die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung kommen ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen. KECHAVARZI et al. (2010) haben bei einer Inkubationstemperatur von  $30^\circ \text{C}$  einen geringeren Einfluss der Wasserspannung auf die Respiration gemessen als bei  $10^\circ \text{C}$  und  $20^\circ \text{C}$ . LORENZ (2008) hat erst ab einer pF-Stufe von 3.0 einen relevanten Einfluss auf die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates nachweisen können. KLUGE et al. (2008) haben bei Torfen aus dem Randow-Welse Bruch bei einer pF-Stufe von 2.5 bzw. 3.0 maximale  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates gemessen; WESSOLEK et al. (2002) bei Torfen aus dem Rhinluch bei pF 1 und pF 2.8 und BERGLUND et al. (2008) bei Torfen aus Zentral- und Südschweden bei Entwässerungsstufen von pF 0.7 und pF 1.6.

#### 4.2.5. CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen

Aus den gemessenen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten wurden mit Hilfe einer nichtlinearen multiplen Regressionsanalyse CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen erstellt (Tab. 11). Diese ermöglichen eine Berechnung der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrates für unterschiedliche Wassergehalte und Temperaturen.

Die mit den Funktionen aus Tab. 11 berechneten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten sind volumenbezogen und werden in g\*m<sup>-3</sup>\*d<sup>-1</sup> angegeben. Eine Umrechnung auf eine gewichtsbezogene Freisetzungsrates ist mit den jeweiligen Trockenrohdichten (TRD) der Torfe möglich (Tab. 8).

**Tabelle 11:** CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen der untersuchten Torfsubstrate

Substrat	H	R <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> -Freisetzungsfunktionen*
<b>BFOB</b>	8-9	0.97	$z = 0.381 + 0.775x + 0.242y - 0.339x^2 + 0.038y^2 - 0.098xy$
<b>BFUB</b>	3-4	0.97	$z = 1.168 + 2.910x + 0.039y - 1.020x^2 + 0.017y^2 + 0.077xy$
<b>LIETZ</b>	10	0.94	$z = 1.060 + 2.229x + 0.111y - 0.980x^2 + 0.005y^2 + 0.145xy$
<b>HKF</b>	3-4	0.97	$z = 0.401 + 1.292x - 0.049y - 0.598x^2 + 0.006y^2 + 0.097xy$
<b>RAW GM OB</b>	5	0.95	$Z = -4.818 + 6.881x - 0.178y - 1.819x^2 + 0.022y^2 + 0.120xy$
<b>RAW GM UB</b>	5	0.97	$Z = -0.889 + 2.168x - 0.041y - 0.601x^2 + 0.008y^2 + 0.063xy$
<b>RAW MM OB</b>	5	0.96	$Z = -0.972 + 3.406x - 0.328y - 0.966x^2 + 0.024y^2 + 0.219xy$
<b>RAW MM UB</b>	4	0.96	$Z = -1.408 + 2.835x - 0.201y - 0.837x^2 + 0.015y^2 + 0.117xy$
<b>RAW M OB</b>	5	0.97	$Z = -4.059 + 6.610x - 0.261y - 1.752x^2 + 0.02y^2 + 0.175xy$
<b>RAW M UB</b>	3-4	0.97	$Z = -0.528 + 2.875x - 0.330y - 0.812x^2 + 0.023y^2 + 0.223xy$

\*z = CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrates (g\*m<sup>-3</sup>\*d<sup>-1</sup>); x = Wasserspannung im Boden (pF);

y = Bodentemperatur (); H = Zersetzungsgrad nach von POST.

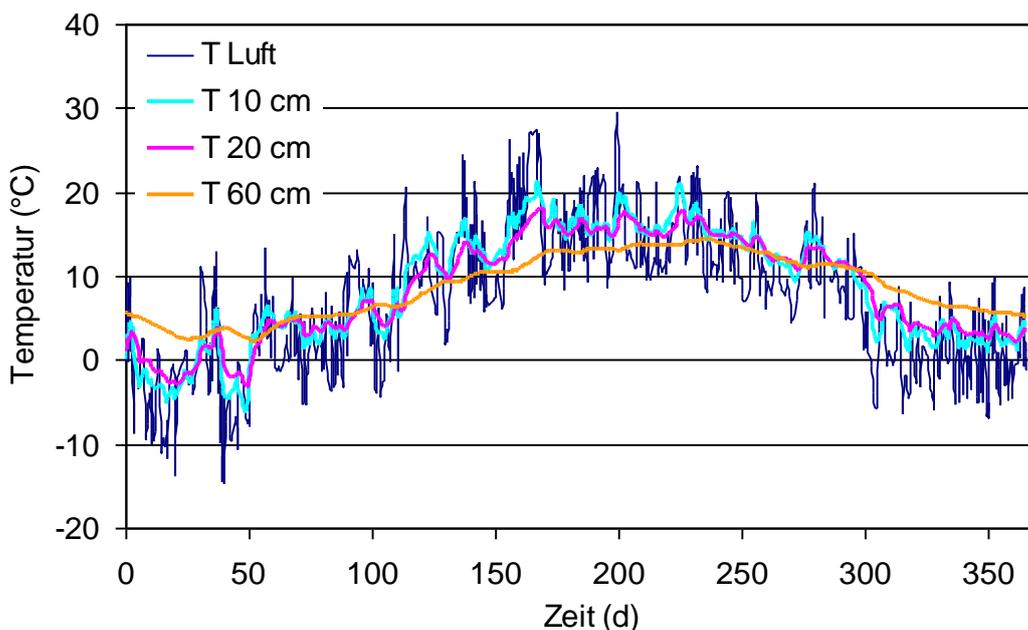
### 4.3. Simulationsfallstudien Randow-Welse-Niederung

Mittels Simulationsfallstudien (siehe Tab. 4) wurde im nächsten Schritt untersucht, welchen Einfluss die Umweltbedingungen Klima, Grundwasserstand und Nutzungsform auf den Bodenwasser- und Temperaturhaushalt und damit auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus der Niedermoorprofile der Randow-Welse-Niederung haben.

#### 4.3.1. Temperaturhaushalt der Niedermoorprofile

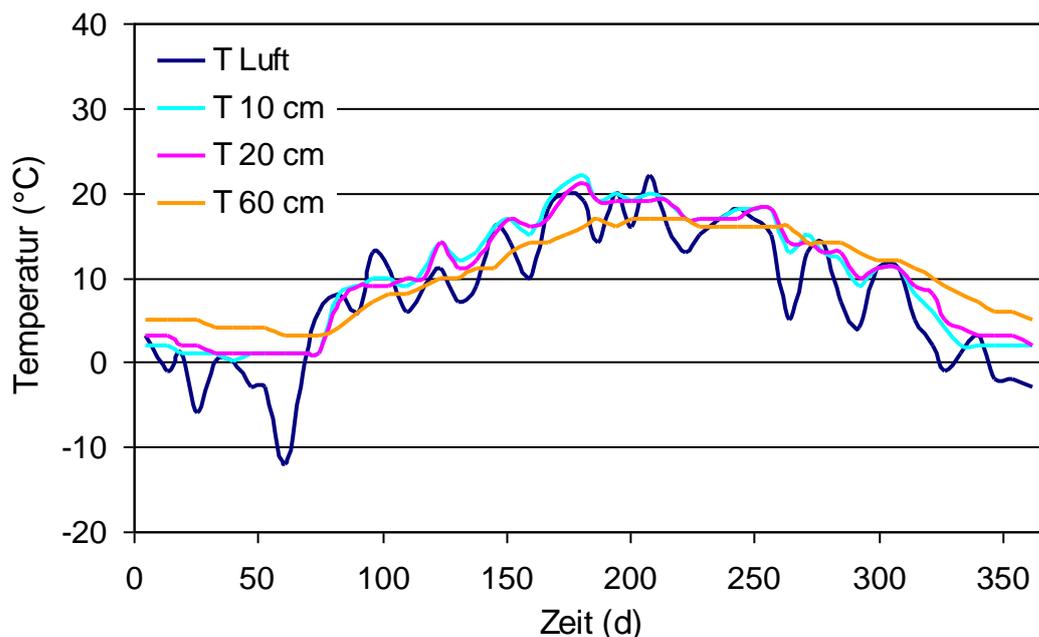
<b>Szenario:</b>	Vegetation:	Gras
	Klima:	durchschnittliches Jahr (siehe Tab. 4)
	Mittlerer GW-Stand:	60 cm unter GOK

Die Beziehung der Bodentemperatur zur Lufttemperatur sowie die Änderung der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen spielen für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung eine wichtige Rolle. Der modellierte Verlauf der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen über ein Jahr ist in Abb. 13 dargestellt.



**Abbildung 13:** Lufttemperatur (T Luft) und modellierte Bodentemperaturen (T 10 cm; T 20 cm und T 60 cm) in verschiedenen Tiefen über einen Zeitraum von einem Jahr (01.01 – 31.12.).

Um die berechneten Bodentemperaturen (Abb. 13) auf Plausibilität zu prüfen, wurden diese mit im Moor gemessenen Bodentemperaturen von HÖLL (2007) verglichen (Abb. 14).



**Abbildung 14:** Jahresverlauf der gemessenen Lufttemperatur und Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen eines Niedermoorprofils im Donauried (Daten aus HÖLL 2007).

Die Ganglinien der gemessenen Werte (Abb. 14) weisen geringere Schwankungen in der Luft- und Bodentemperatur auf, als die modellierten Ganglinien (Abb. 17). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die gemessenen Daten von HÖLL (2007) in einem Abstand von 7 Tagen erfasst wurden. Die Modellierung hingegen erfolgte auf täglicher Basis.

Mit zunehmender Tiefe nimmt der Einfluss kurzfristiger Temperaturänderungen ab. Die jahreszeitliche Dynamik in 60 cm Tiefe (Ansteigen der Temperatur vom Frühjahr bis in den Hochsommer und fallende Temperaturen von Herbst bis Winter) zeigen sowohl die gemessenen, als auch die modellierten Werte.

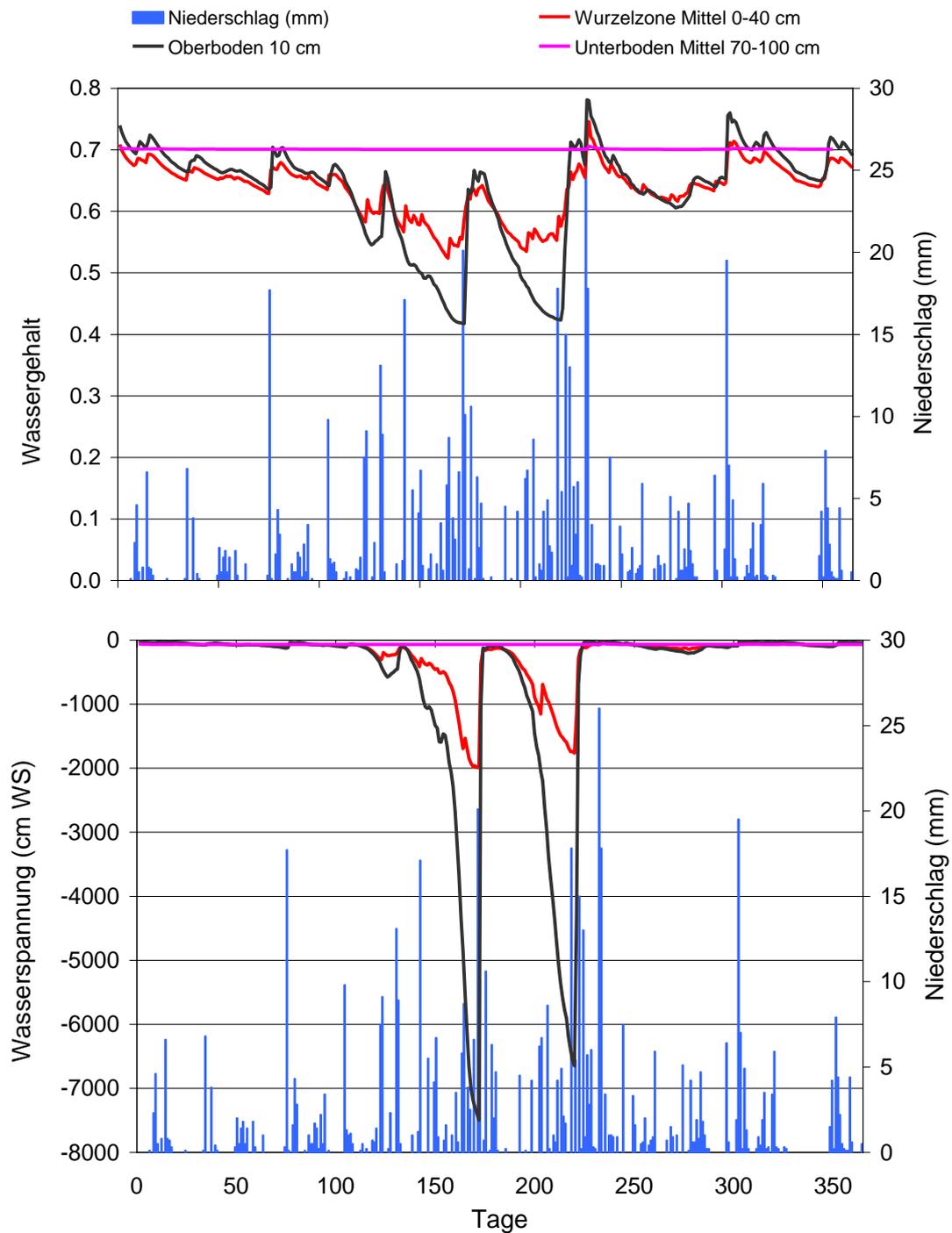
Ein Vergleich mit Messdaten von HÖLL (2007) zeigt, dass das entwickelte Modell die Bodentemperaturen von Niedermoorprofilen plausibel berechnen kann. Dies gilt für verschiedene Tiefen und für einen Zeitraum von mehreren Jahren.

#### 4.3.2. Wasserhaushalt der Niedermoorprofile

Szenario:	Vegetation:	Gras
	Klima:	durchschnittliches Jahr (siehe Tab. 4)
	Mittlerer GW-Stand:	60 cm unter GOK

Die Wassergehalte der Niedermoortorfe bzw. der Grundwasserstand sind neben der Temperatur ein steuernder Faktor für die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Mooren (Kap. 2.4.3). Die modellierten Jahresverläufe des Wassergehaltes und der Wasserspannung eines Randow-Welse Profils (RAW MM) in verschiedenen Tiefen zeigt Abb. 15.

In 70 cm Bodentiefe ist die Wasserspannung das ganze Jahr über gleich bleibend nahe Null, da als untere Randbedingung ein Grundwasserstand von 60 cm unter GOK gesetzt wurde. Durch die Austrocknung und die Wasserentnahme durch die Pflanzenwurzeln erhöhen sich die Bodenwasserspannungen im Wurzelraum bis 40 cm Tiefe in den Sommermonaten.



**Abbildung 15:** Modellierte Wassergehalte (oben) und Wasserspannungen (unten) des Niedermoorprofils RAW MM in verschiedenen Tiefen sowie Niederschläge im Jahresverlauf.

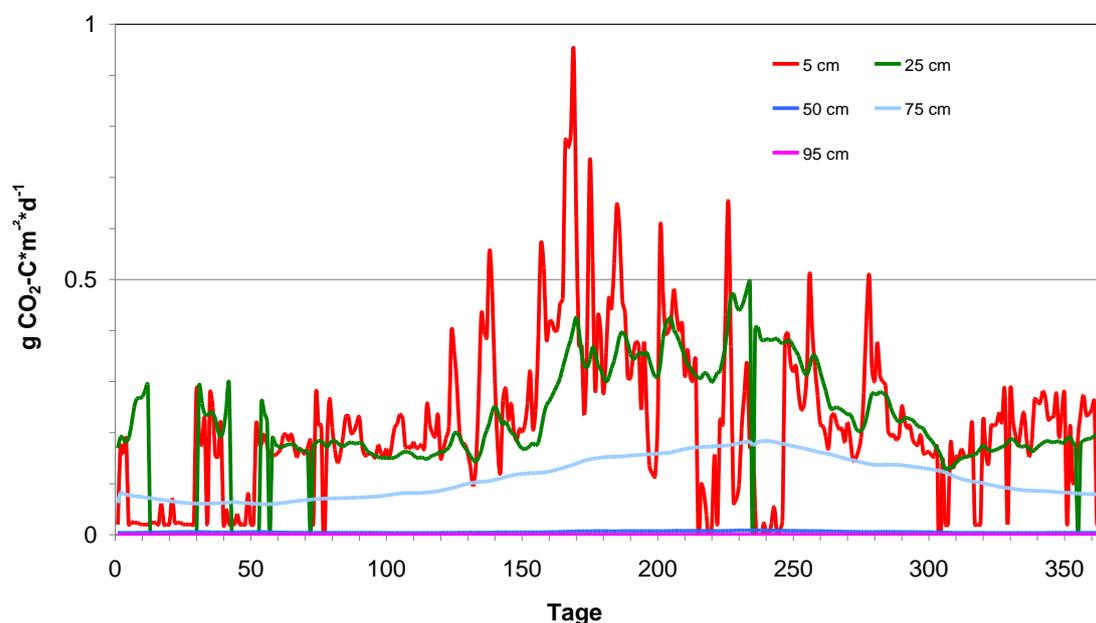
Dies zeigt sich noch stärker in den obersten zehn Zentimetern. Das kurzfristige Absinken und Ansteigen der Wasserspannung ist durch Niederschläge bedingt. Diese führen zu einer kurzzeitigen Wassersättigung des Torfes im Oberboden.

SCHWÄRZEL et al. (2006) haben bei Felduntersuchungen in einem Niedermoorprofil mit einem mittleren GW-Stand von 50 cm in 20 - 40 cm Tiefe Wasserspannungen zwischen ca. 100 und 300 hPa gemessen. In der Tiefe von 10 cm betragen die Wasserspannungen im Mittel ca. 200 hPa, in heißen Sommerperioden ohne Niederschläge im Mittel ca. - 2000 hPa, wobei der Wassergehalt auf 35 Vol. % sank. Die modellierten Werte in einer Tiefe von 20 cm liegen, verglichen mit den Werten von SCHWÄRZEL et al. (2006), in einer Größenordnung.

Der Vergleich mit Messdaten von SCHWÄRZEL et al. (2006) zeigt, dass das entwickelte Modell plausible Wassergehalts- und Wasserspannungswerte in verschiedenen Tiefen für den Standort Randow-Welse-Niederung (RAW MM) berechnen kann. Dabei werden auch die Einflüsse des Grundwasserstandes und des Klimas berücksichtigt.

#### 4.3.3. CO<sub>2</sub>-Freisetzung in verschiedenen Bodentiefen

Szenario:	Landnutzung:	Grünland intensiv (GW 80-120 cm)
	Klima:	durchschnittliches Jahr (siehe Tab. 4)
	Profil:	Randow mittelmächtig (RAW MM)



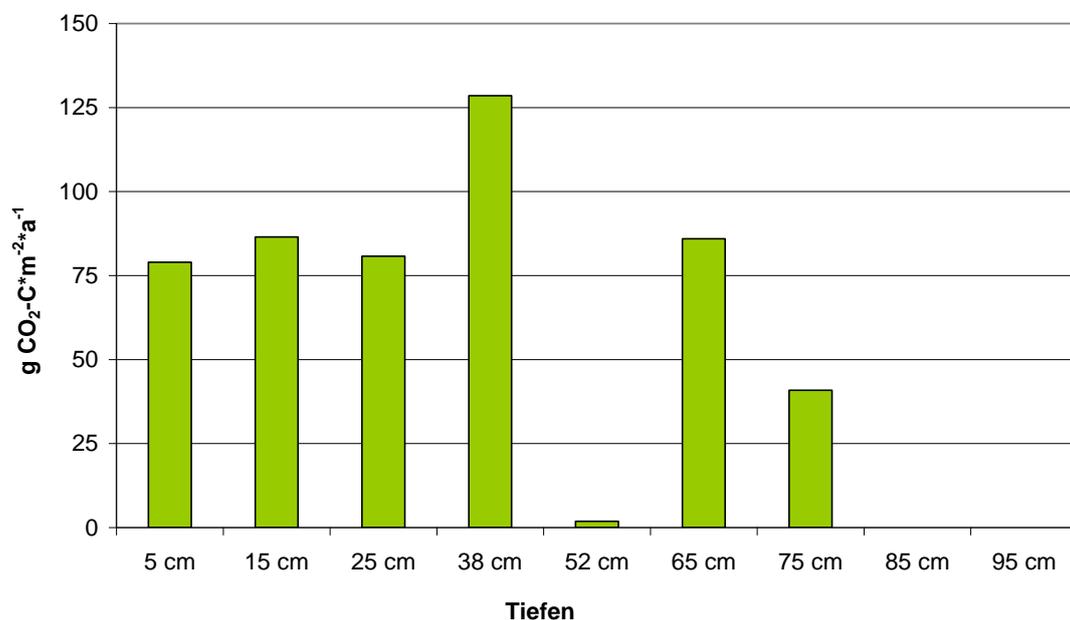
**Abbildung 16:** CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten in einem mittleren Klimajahr (1989) ausgewählter Tiefen des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM).

Die Temperatur und der Wasserhaushalt des Bodens wurde mit HYDRUS 1D für einzelne Teilhorizonte modelliert. In Verbindung mit den CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen war es möglich, die CO<sub>2</sub>-Freisetzung für die jeweiligen Teilhorizonte zu berechnen und differenziert zu betrachten (Abb. 16).

Die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates aus dem Oberboden unterliegt stärkeren und kurzfristigeren Schwankungen als die Freisetzungsrates aus dem Unterboden. Dies zeigt sich auch in den  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der einzelnen Tiefen. Eine jahreszeitliche Abhängigkeit der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung ist ebenfalls in allen Tiefen zu erkennen (Abb. 17).

Die klimabedingte Änderung des Wassergehaltes und der Temperatur im Oberboden hat zur Folge, dass auch die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung aus diesem Horizont permanenten Schwankungen unterliegt.

Vergleicht man die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der verschiedenen Tiefen, ist zu erkennen, dass der Einfluss des Klimas mit zunehmender Profiltiefe abnimmt (Abb. 16) Die Abb. 17 zeigt die kumulierte  $\text{CO}_2$ -Freisetzung in den verschiedenen Bodentiefen. Die geringe  $\text{CO}_2$ -Freisetzung in 52 cm, 85 cm und 95 cm ist durch die Lage der mineralischen Mudden im Niedermoorprofil (RAW MM) der Randow-Welse-Niederung bedingt.



**Abbildung 17:** Kumulative  $\text{CO}_2$ -Freisetzung eines Jahres in verschiedener Bodentiefen des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM).

In diesem Szenario werden  $373 \text{ g CO}_2\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  aus dem Oberboden und  $129 \text{ g CO}_2\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  aus dem Unterboden freigesetzt. Dies führt in der Summe zu einer Gesamtfreisetzung von  $502 \text{ g CO}_2\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . Die Anteile des Ober- und Unterbodens an der jährlichen Gesamtfreisetzung von  $\text{CO}_2$  sind aufgrund des hohen Muddenanteils im Unterboden des Profils sehr unterschiedlich. So wird im Tiefenbereich von 50 cm aufgrund einer Sandmudde beim Profil RAW MM kaum  $\text{CO}_2$  freigesetzt. Gleiches gilt für die Schluff- und Tonmudden im Profilsbereich von 85 – 95 cm (Abb. 17).

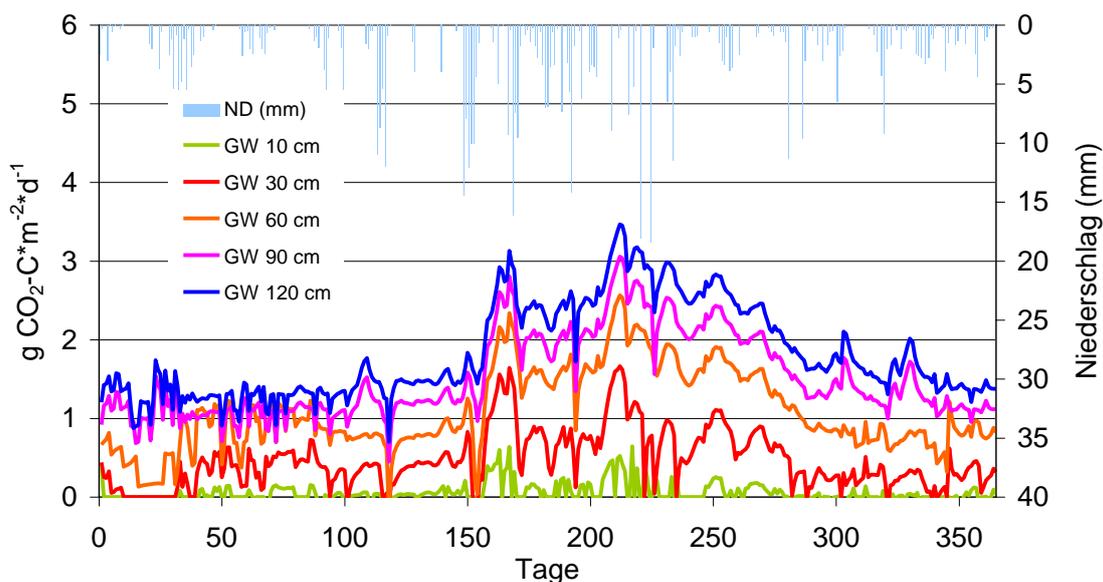
Die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung kann somit je nach Profilaufbau, Landnutzungsform und Grundwasserstand stark variieren.

#### 4.3.4. CO<sub>2</sub>-Freisetzung für verschiedene Grundwasserstände

Szenario:	Vegetation:	Gras
	Klima:	durchschnittliches Jahr (siehe Tab. 4)
	GW-Stand:	konstant für 10, 30, 60, 90, 120 cm u. GOK

Mit konstant verlaufenden Grundwasserständen wurde untersucht, welchen Einfluss der Grundwasserstand auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung hat (Abb. 18). Mit sinkendem GW-Stand nimmt die tägliche CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten zu. Dies wurde unter anderem bereits in Untersuchungen von MUNDEL (1976), AUGUSTIN (2001) und WESSOLEK et al. (2002) beschrieben.

Die höchsten Freisetzungsraten weist das Szenario auf, in dem mit einem GW-Stand von 120 cm unter GOK gerechnet wurde. Befindet sich der GW-Stand bei 10 cm unter GOK, kommt es über längere Zeiträume zu keiner bzw. nur zu sehr geringen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten. Eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten bei steigenden Grundwasserständen wird durch die Vergrößerung der belüfteten Bodenzone verursacht, die mit einem größeren Lebensraum für Bakterien verbunden ist (vgl. Kap. 2.4.3).



**Abbildung 18:** CO<sub>2</sub>-Freisetzung in einem mittleren Klimajahr des Profils Randow-Welse mittel-mächtig (RAW MM) bei verschiedenen Grundwasserständen (konstant) unter Grünlandnutzung.

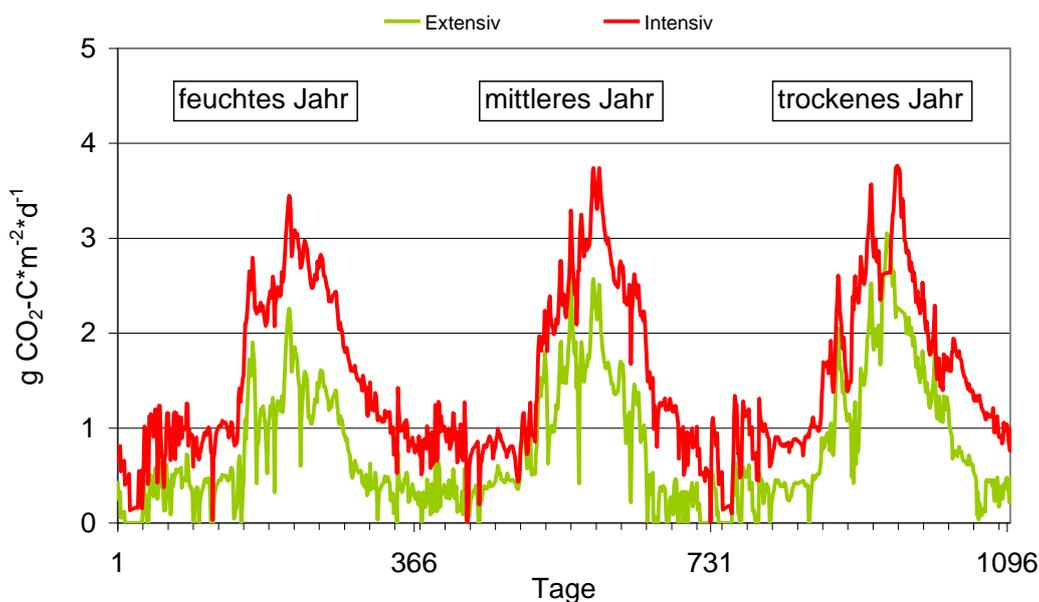
#### 4.3.5. Klimaeinfluss

Zur Untersuchung der Auswirkungen klimatischer Bedingungen auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung, wurden verschiedene Klimaszenarien erstellt und berechnet. Die Nutzungsformen wurden dabei nicht verändert (Grünland intensiv; Grünland extensiv - siehe Tab. 4).

Der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ist in Abb. 19 dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten werden durch die klimatischen Randbedingungen deutlich beeinflusst und folgen dem Jahreszeitlichen Temperaturverlauf. In den Wintermonaten sind die Freisetzungsraten am niedrigsten, in den Sommermonaten am höchsten. Im täglichen Verlauf beeinflussen Niederschlagsereignisse und schwankende Temperaturen die Freisetzungsraten.

Die Klimajahre unterscheiden sich in der Höhe der Gesamt CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Dies zeigt sich vor allem bei dem Szenario der extensiven Grünlandnutzung. Hierbei sind die täglichen Freisetzungsraten in den Sommermonaten im trockenen/heißen Jahr am höchsten, im feuchten/kalten Jahr am niedrigsten. Die freigesetzten Gesamtsummen betragen bei der extensiven Grünlandnutzung im kalten/feuchten Jahr 248 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup>, im mittleren Jahr 275 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> und 334 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> im heißen/trockenen Jahr. Für die intensive Grünlandnutzung beträgt die freigesetzte Gesamtsumme im kalten/feuchten Jahr 548 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup>, im mittleren Jahr 550 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> und im heißen/trockenen Jahr 575 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup>.

Der Einfluss des Klimas ist bei der extensiven Grünlandnutzung stärker ausgeprägt, da geringe Niederschlagsereignisse eine kurzfristige Aufsättigung der durchlüfteten Torfschichten bewirken können, was wiederum zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung führt (vgl. auch Abb. 18; Abb. 20).



**Abbildung 19:** CO<sub>2</sub>-Freisetzung des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) unter extensiver (Grundwasserstandsamplituden zwischen 40 - 60 cm unter GOK) und intensiver (Grundwasserstandsamplituden zwischen 80 - 120 cm unter GOK) Grünlandnutzung für drei verschiedene Klimajahre.

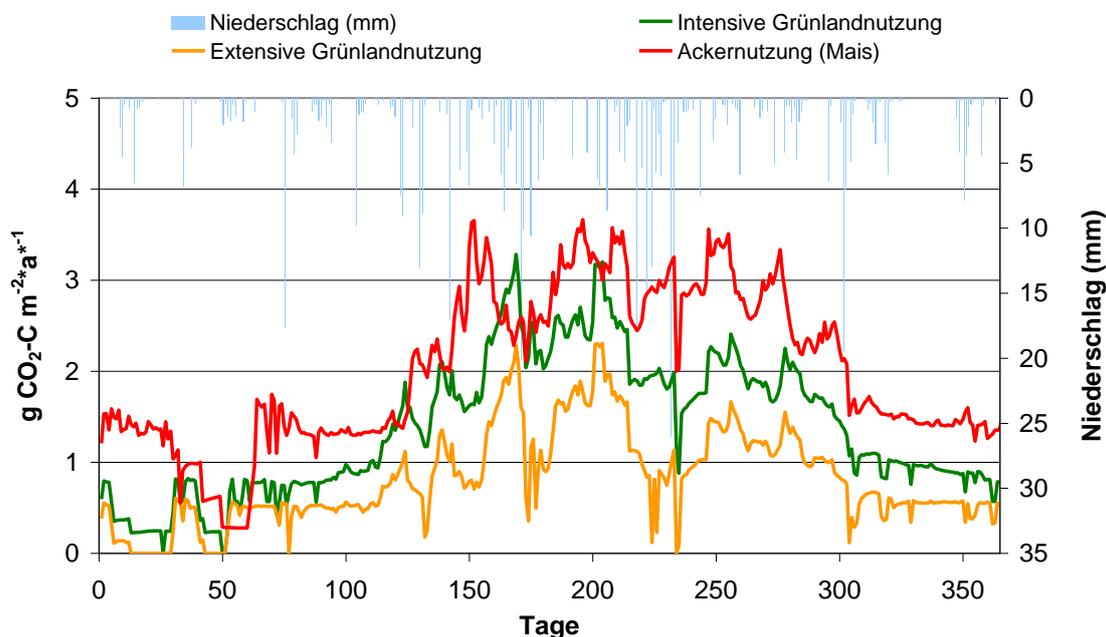
Aufgrund des größeren Grundwasserflurabstandes bei der intensiven Grünlandnutzung liegen in den oberen Torfschichten ganzjährig geringe Wassergehalte vor, weshalb Niederschlagsereignisse seltener zu einer Aufsättigung führen.

Eine Modellierung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung für das Niedermoorprofil RAW MM bei verschiedenen Grundwasserständen über einen Verlauf von 10 Jahren (1980-1989) befindet sich im Anhang (Anhang A6).

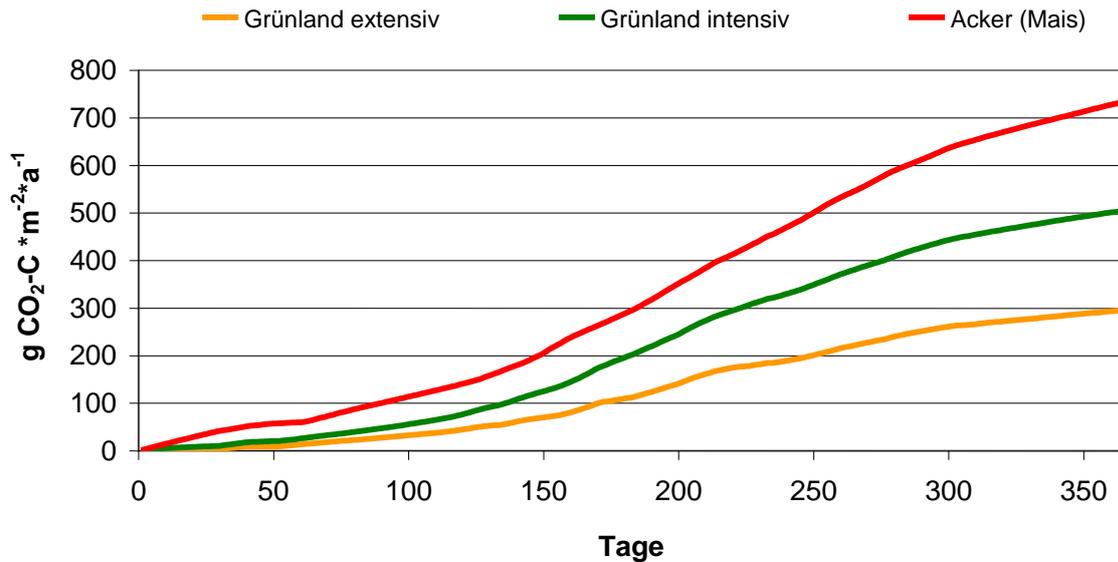
#### 4.3.6. CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei verschiedenen Landnutzungen

Um den Einfluss der Landnutzung auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung abzubilden, wurden unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien modelliert. Die täglichen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten bei unterschiedlicher Landnutzung zeigt Abb. 20.

Die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten bei extensiver Grünlandnutzung liegen deutlich unter den Freisetzungsraten, die bei intensiver Grünland- und Ackernutzung auftreten. Die Dynamik der Freisetzungsraten ist bei den unterschiedlichen Nutzungsformen ähnlich. Um zu verdeutlichen, wie sich die jährliche Freisetzung von CO<sub>2</sub> bei unterschiedlicher Landnutzung ändert, sind in Abb. 21 die kumulierten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten abgebildet. Die Modellierung ergibt eine Freisetzung von 295 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> bei extensiver Grünlandnutzung, 505 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> bei intensiver Grünlandnutzung und 734 g CO<sub>2</sub>-C\*m<sup>-2</sup>\*a<sup>-1</sup> bei ackerbaulicher Nutzung (Abb. 21).



**Abbildung 20:** Jahresverlauf der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) bei unterschiedlichen Landnutzungen; mittleres Klimajahr.



**Abbildung 21:** Kumulierte CO<sub>2</sub>-Freisetzung des Profils Randow-Welse mittelmächtig (RAW MM) bei unterschiedlicher Landnutzung.

Bei HÖPER (2007) liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen intensiv genutzter Grünlandflächen auf Niedermooren gegenüber extensivem Grünland etwa 15 % höher. Bei ackerbaulich genutzten Niedermooren steigt die CO<sub>2</sub>-Freisetzung laut HÖPER (2007) um 60 % im Vergleich zu intensiver Grünlandnutzung. BYRNE et al. (2004) haben hingegen nur geringe Unterschiede zwischen Grünland- und Ackernutzung feststellen können. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei Ackernutzung ist laut BYRNE et al. (2004) sogar etwas geringer als bei Grünlandnutzung.

So werden zwar kürzere Bodenbedeckungszeiten in Form von schneller erwärmenden Bodenflächen im Modell berücksichtigt, die Faktoren wie z.B. Düngung und Umbruch (vgl. Kap. 2.4.5) jedoch nicht abgebildet. Um diese Effekte mit dem Modell in Zukunft sicherer abzubilden sind weitere Modellanpassungen und Kalibrierungen erforderlich.

#### 4.3.7. Kalibrierung der CO<sub>2</sub> Modellergebnisse

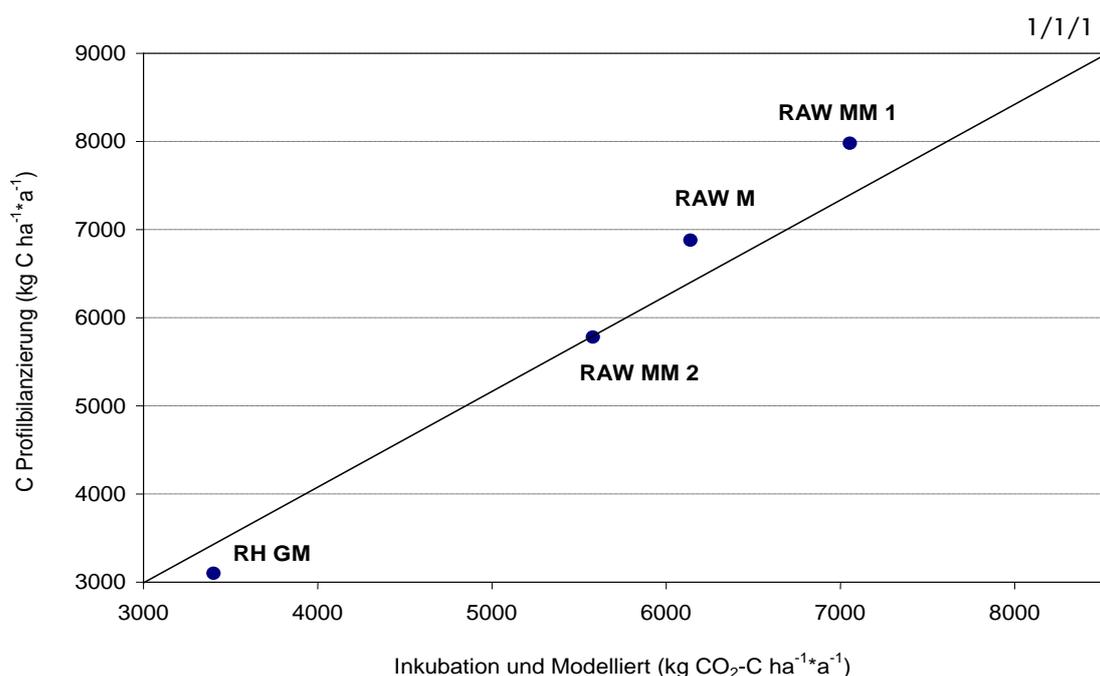
Zur Validierung des entwickelten Modelles wurden die berechneten Ergebnisse mit Langzeitmessungen zu Kohlenstoffverlusten verschiedener Niedermoore der Randow-Welse-Niederung und des Rhinluchs in Beziehung gesetzt. Für diese beiden Gebiete liegen detaillierte Untersuchungen über die Abnahme der Moormächtigkeiten, zur Veränderung der C<sub>org</sub>-Gehalte und der Trockenrohdichte vor (vgl. hierzu RENGER et al. 1999; KLUGE et al. 2008; WESSOLEK 2002). Abb. 22 zeigt die CO<sub>2</sub>-Verluste dieser C-Profilbilanzierung für verschiedene Niedermoorprofile im Vergleich mit den modellierten Ergebnissen.

Die Eingangsparameter in das numerische Modell waren:

Moormächtigkeit,  $\text{CO}_2$ - Freisetzungsraten einzelner Horizonte (Substrate) als Funktion der Wassergehalte und der Temperatur, bodenhydraulische und -thermische Parameter ( $pF$ ,  $ku$  und Wärmeleitfähigkeit) der einzelnen Bodenhorizonte, Grundwasseramplituden, Klimabedingungen auf täglicher Basis sowie Pflanzenparameter (Durchwurzelungstiefe, Wuchshöhe, Bedeckung und spezifische Pflanzenwiderstände für den Wassertransport). Bei der Modellkalibrierung wurden auch die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsraten aus der Literatur (s. Abb. 23 und Kap. 5.1) herangezogen und in den Berechnungsalgorithmus integriert.

Der Vergleich in Abb. 22 zeigt, dass im Falle der Profile RAW MM 1 und RAW M die jährlichen  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsraten gegenüber den Profilbilanzierungen unterschätzt, bei RH GM dagegen leicht überschätzt werden. Die Modellergebnisse von RAW MM 2 treffen hingegen die Ergebnisse der Profilbilanzierung sehr gut.

Insgesamt gehen wir davon aus, dass der von uns gewählte Ansatz die aktuelle  $\text{CO}_2$ -Freisetzung aus Niedermooren gut abbilden kann. Leider liegen nur wenig gut dokumentierte, verfügbare Langzeitmessreihen vor, die wir in den Vergleich einbeziehen konnten. Hier besteht ein gewisser Mangel an vorhandenen Dauermessflächen.

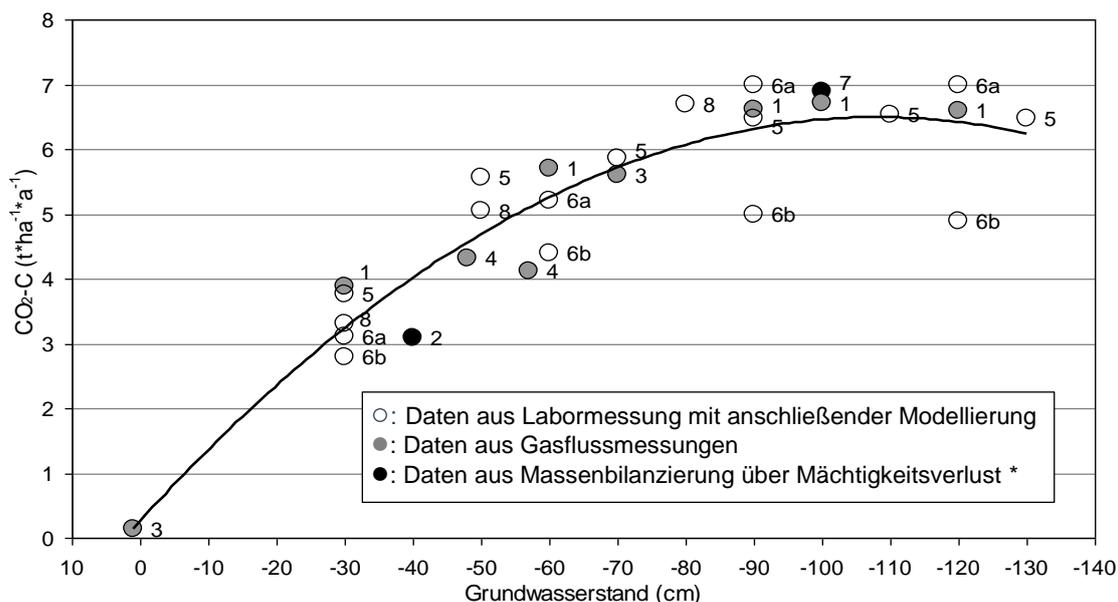


**Abbildung 22:** Vergleich C-Profilbilanzierung von verschiedenen Niedermoorprofilen über insgesamt 40 Jahre mit den Ergebnissen des erstellten Modells (= Ergebnisse der Modellkalibrierung).

## 5. Regionalisierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 5.1. Ableitung aus Literaturstudien

Durch eine Literaturschau wurde zunächst eine Regressionsanalyse zur Erstellung einer einfachen Berechnungsregel für die CO<sub>2</sub>-Freisetzung durchgeführt. Die klimatischen Randbedingungen und die Bewirtschaftungsart sind bei allen Studien ähnlich. Um die dennoch teilweise großen Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Freisetzung differenzieren zu können, wurden diese in Beziehung zum vorherrschenden GW-Stand gesetzt (Abb. 23).



**Abbildung 23:** Jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus norddeutschen Niedermooren Mächtigkeitsspanne: 80 – 150 cm unter Grünlandnutzung in Abhängigkeit vom Grundwasserstand im Jahresmittel. (\* Zusammenstellung von Ergebnissen folgender Autoren: 1 - MUNDEL 1976; 2 - WESSOLEK et al. 1999; 3 - GENSIOR & ZEITZ 1999; 4 - MEYER et al. 2001; 5 - WESSOLEK et al. 2002; 6a, 6b - RENGER et al. 2002; 7 - KLUGE 2003; 8 - KLUGE et al. 2008. Anzahl der Datenpunkte n = 28).

Die Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Freisetzung vom GW-Stand ist in Abb. 23 deutlich zu erkennen. Bei einem Grundwasserstand nahe der Geländeoberkante (GOK) zeigt sich nur noch eine geringe CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Boden. Mit sinkendem GW-Stand nimmt die jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung stetig zu, bis sie bei einem Grundwasserstand von ca. 110 cm ein Maximum erreicht.

Abb. 23 zeigt, dass die aus Massenbilanzierung, Freilandmessungen und aus Laborexperimenten ermittelten Freisetzungsraten ähnlich stark durch den Grundwasserstand beeinflusst werden.

Nahezu alle Werte liegen in einem ähnlichen Größenbereich; die durchgeführte Regressionsanalyse der verwendeten Daten ergab folgenden mathematischen Zusammenhang zwischen Grundwasserstand und CO<sub>2</sub>-Freisetzung:

$$y = -0.000531 \cdot x^2 - 0.115 \cdot x + 0.261 \quad [3]$$

mit: y = CO<sub>2</sub>-C Freisetzung (kg\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>); x = Grundwasserstand unter GOK (cm).

Das Bestimmtheitsmaß von Gleichung 3 beträgt R<sup>2</sup>= 0.85. Der ermittelte Kurvenverlauf ist in der Literatur bereits von MUNDEL (1976) und RENGER et al. (2002) beschrieben worden. Die Abnahme der Torfmineralisation bei sehr großen Grundwasserflurabständen (> 100 cm) hängt vermutlich mit der starken Austrocknung der oberen Bodenschicht zusammen. Laut Bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC AG BODEN 2005) beträgt der kapillare Aufstieg bei Torfen der Zersetzungsstufe H5 - H10 bei einem GW-Stand von 70 cm unter GOK ca. 0.3 mm\*d<sup>-1</sup>. Bei einem GW-Stand von 110 cm unter GOK steigt kein Wasser mehr kapillar auf, was in Trockenperioden zu einer starken Austrocknung des Oberbodens führt (AD-HOC AG BODEN 2005). Die Umweltbedingungen für die Bodenorganismen verschlechtern sich bei zunehmendem Trockenstress, was zu einem verminderten Torfabbau und somit zu geringeren CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten führen kann (RENGER et al. 2002).

## 5.2. Ableitung aus Messdaten und Modellierung

Aus den CO<sub>2</sub> Labormessungen der unterschiedlichen Torfsubstrate und der anschließenden Modellierung wurden über multiple nichtlineare Regressionsanalysen CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten in Abhängigkeit von Grundwasserstand, Moormächtigkeit und Nutzung ermittelt. Dabei wurden die Variablen Grundwasserstand, Vegetation, Bedeckungsgrad (Bodentemperatur), Mächtigkeit und Zusammensetzung der Torfschichten innerhalb der Niedermoorprofile variiert. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung von Niedermoores unterschiedlicher Mächtigkeit und Nutzung lässt sich durch folgende Funktionen (Gl. 4-7) ausdrücken.

Die Abb. 24 zeigt den Zusammenhang zwischen Grundwasserstand, Moormächtigkeit und Nutzung für Niedermoores, deren Profil vollständig aus organischen Torfen zusammengesetzt ist, während Abb. 25 diesen Zusammenhang an einem Profil mit einem Anteil von 30 % Mudden zeigt.

## CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen für Niedermoore (reines Torfprofil)

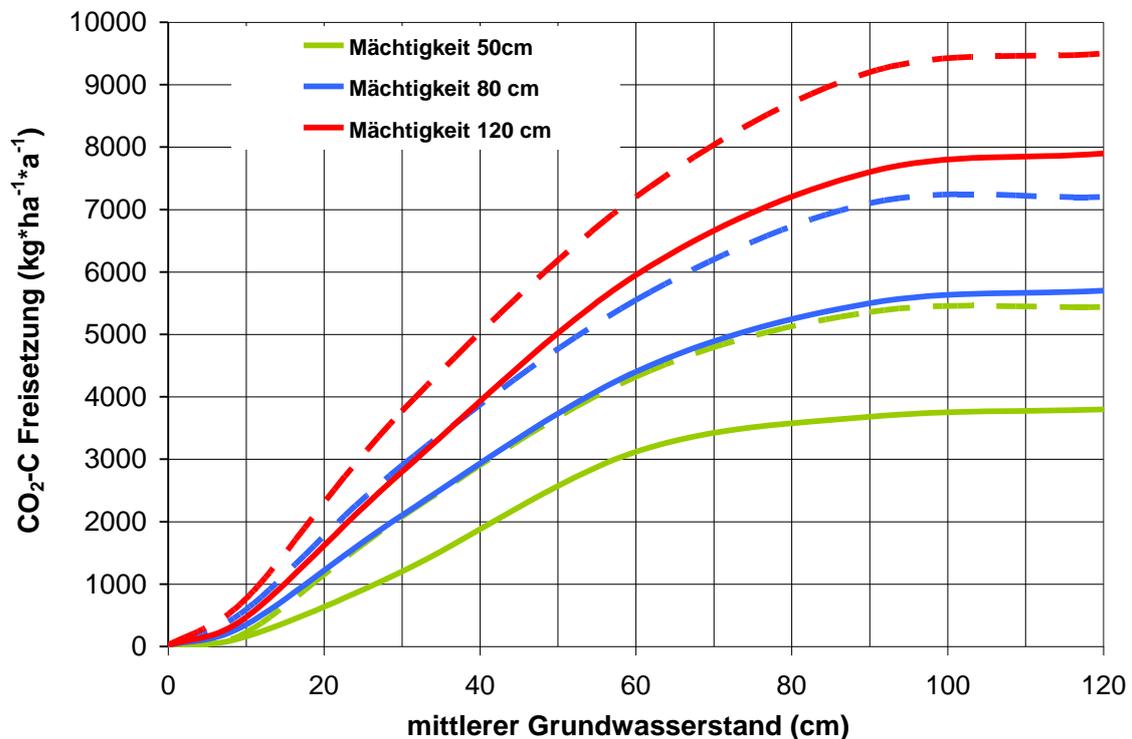
Für Grünlandnutzung:

$$y = -1727.43 + 26.32 \cdot x_1 + 61.79 \cdot x_2 - 0.1 \cdot x_1^2 - 0.41 \cdot x_2^2 + 0.47 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad [4]$$

Für Ackernutzung:

$$y = -1538.11 + 18.59 \cdot x_1 + 94.22 \cdot x_2 - 0.05 \cdot x_1^2 - 0.55 \cdot x_2^2 + 0.45 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad [5]$$

mit  $y$  = CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung (kg\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>);  $x_1$  = Moormächtigkeit (cm) und  $x_2$  = Grundwasserstand unter GOK (cm).



**Abbildung 24:** Nomogramm zur Ableitung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus nordostdeutschen Niedermooren (reine Torfe) unter Grünland- und Ackernutzung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit und dem Grundwasserstand. Mächtigkeit 50 cm: stark degradierte Torfe Ober- und Unterboden; Mächtigkeit 80 cm: degradierte Torfe im Oberboden, leicht degradierte im Unterboden; Mächtigkeit 120 cm: degradierte Torfe im Oberboden, kaum degradierte Torfe im Unterboden.

## CO<sub>2</sub>-Freisetzungsfunktionen für Niedermoore (Torf 70 % / Muddenanteil 30 %)

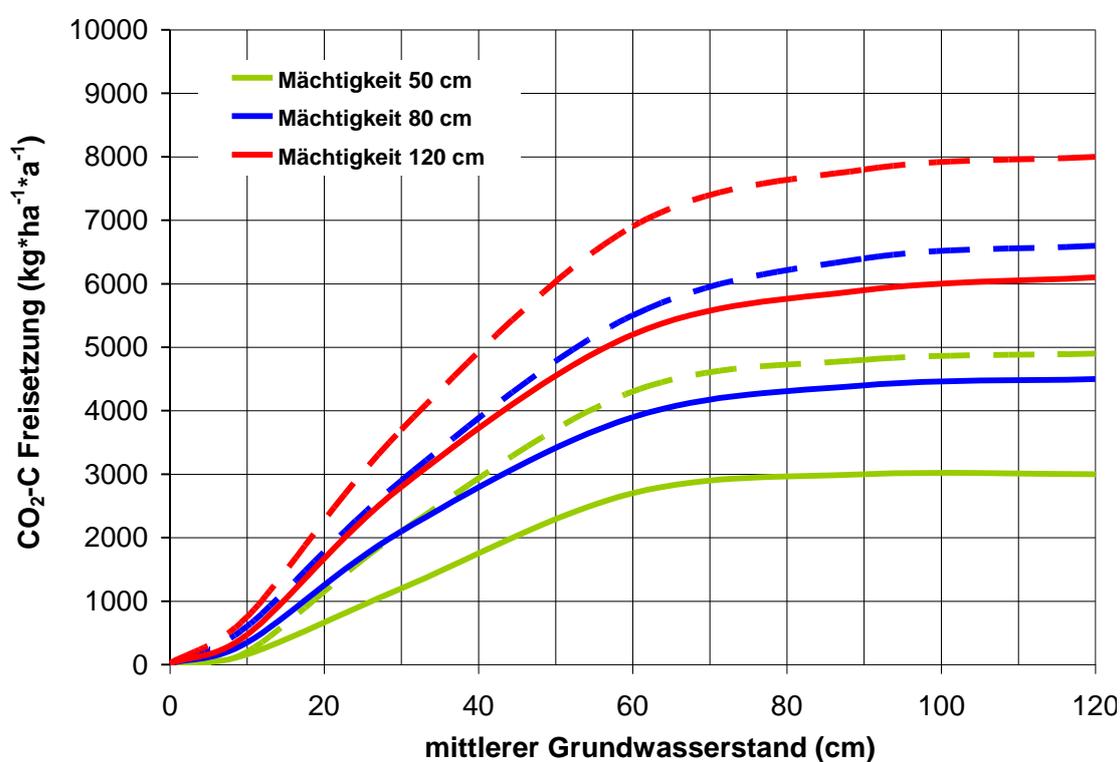
Für Grünlandnutzung:

$$y = -1952.43 + 32.24 \cdot x_1 + 64.21 \cdot x_2 - 0.13 \cdot x_1^2 - 0.43 \cdot x_2^2 + 0.33 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad [6]$$

Für Ackernutzung:

$$y = -2442.62 + 40.88 \cdot x_1 + 102.95 \cdot x_2 - 0.16 \cdot x_1^2 - 0.61 \cdot x_2^2 + 0.32 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad [7]$$

mit  $y = \text{CO}_2\text{-C-Freisetzung (kg*ha}^{-1}\text{*a}^{-1})$ ;  $x_1 = \text{Moormächtigkeit (cm)}$  und  $x_2 = \text{Grundwasserstand unter GOK (cm)}$ .



**Abbildung 25:** Nomogramm zur Ableitung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus norddeutschen Niedermooren (Torfe und 30 % Muddenanteil Unterboden) unter Grünland- und Ackernutzung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit und dem mittleren Grundwasserstand. Mächtigkeit 50 cm: stark degradierte Torfe Ober- und Unterboden; Mächtigkeit 80 cm: degradierte Torfe im Oberboden, leicht degradierte im Unterboden; Mächtigkeit 120 cm: degradierte Torfe im Oberboden, kaum degradierte Torfe im Unterboden.

## 6. Szenarien: Moormächtigkeitsabnahme Randow-Welse-Niederung

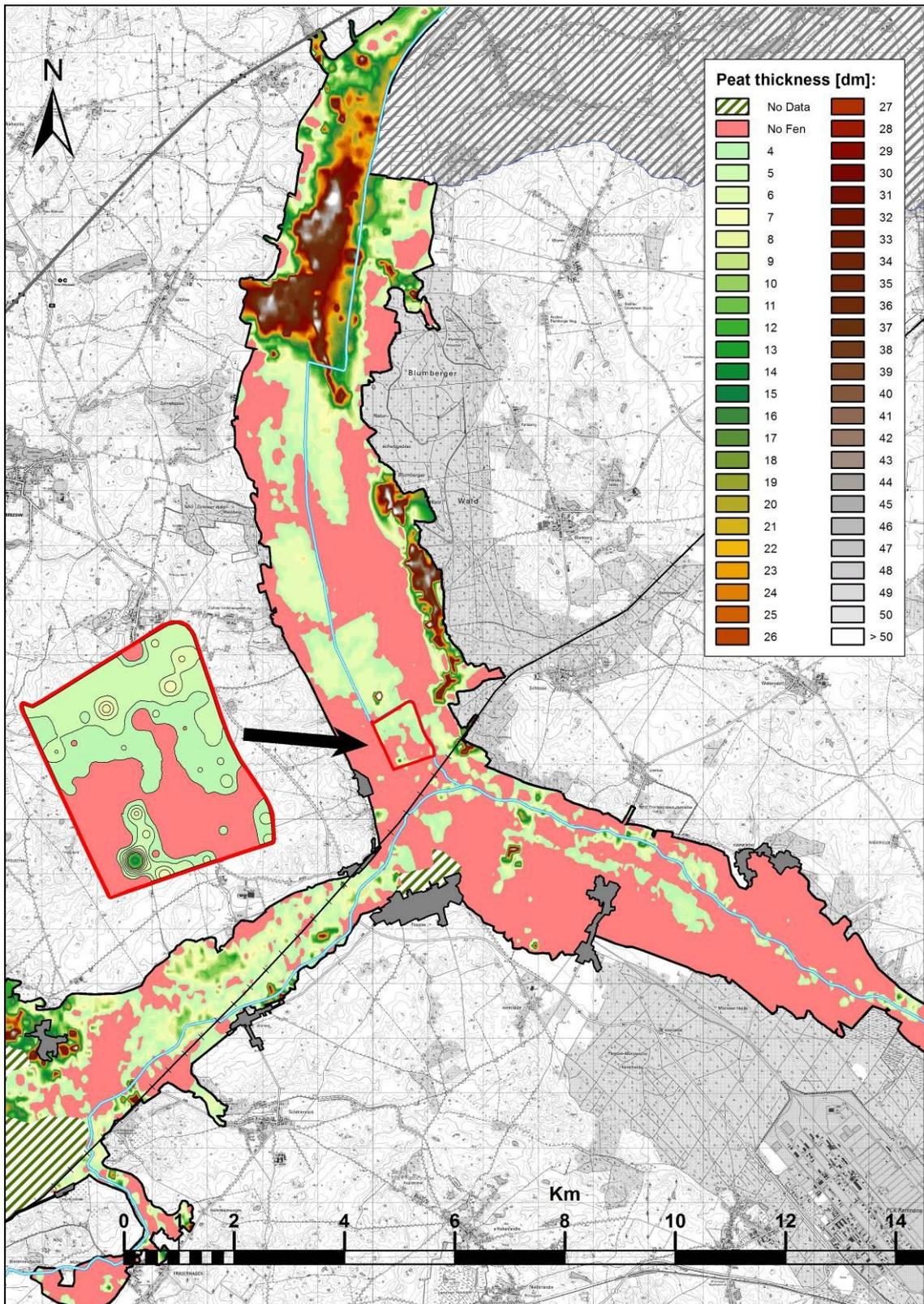
Über die Berechnung der Abnahme der Moormächtigkeiten der Niedermoorreferenzfläche Wendemark in der Randow-Welse-Niederung (Kap. 3.6.1) wurden Szenarien zum zukünftigen Moormächtigkeitsverlust erstellt. Die Abb. 26 zeigt sektorale Mächtigkeitsabnahmen für verschiedene Teilbereiche der Randow-Welse-Niederung bis zum Jahr 2060. Für dieses Szenario wurde eine Grünlandnutzung mit mittlerem Grundwasserstand von 60 cm zugrunde gelegt.

**Tabelle 12:** Hypothetische sektorale Gesamtabnahmen der Moormächtigkeit unter Grünlandnutzung bei mittlerem Grundwasserstand von 60 cm und 40 cm.

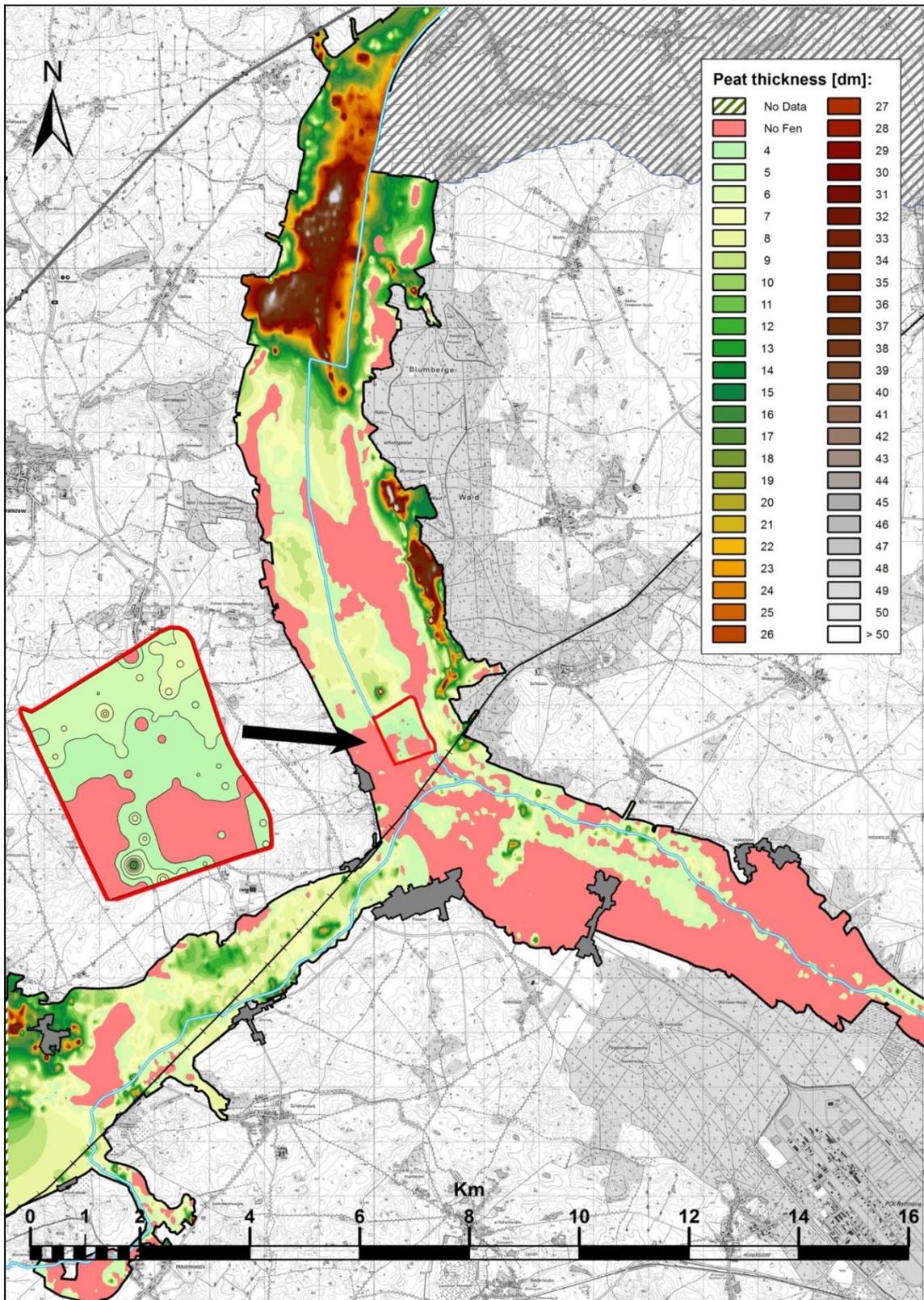
<b>Moormächtigkeitsklassen (dm)</b>	<b>2 - 3</b>	<b>&gt;3 - 8</b>	<b>8 - 12</b>	<b>&gt;12 - 20</b>	<b>20 - 50</b>	<b>&gt;50</b>
<b>Gesamtabnahmen (dm)</b>						
<b>Mittlerer GW-Stand = 60 cm</b>	0	2.88	3.84	6.24	8.64	14.88
<b>2012 - 2060</b>						
<b>Gesamtabnahmen (dm)</b>						
<b>Mittlerer GW-Stand = 40 cm</b>	0	1.73	2.31	3.74	5.18	8.93
<b>2012 - 2060</b>						

Im Vergleich zur aktuellen Moormächtigkeit (vgl. hierzu Abb. 9) werden die ursprünglichen Moorflächen im südöstlichen, südwestlichen und mittleren Teil der Randow-Welse-Niederung bis zum Jahr 2060 zum größten Teil verschwunden sein. Nur vereinzelt treten noch Moorflächen mit Moormächtigkeiten von 3-8 dm auf. Als Moorflächen erhalten bleiben vor allem die Bereiche mit Moormächtigkeiten von 20 - >50 dm im nördlichen sowie in einigen Randbereichen im mittleren und südwestlichem Teil.

Abb. 27 zeigt die Veränderungen der Moormächtigkeiten für einen Teil der Randow-Welse-Niederung unter der Annahme eines mittleren Grundwasserstandes von 30 - 40 cm. Hierfür wurden die Moormächtigkeitsabnahmen über die Freisetzungsfunktionen sektoral reduziert und angepasst.



**Abbildung 26:** Szenario sektorale Abnahme der Moormächtigkeiten in der Randow-Welse-Niederung bis 2060 unter Grünlandnutzung mit mittleren Grundwasserständen von 60 cm u. GOK. Kartengrundlage: DTK 25/LGB 2012; HUB Moorarchiv (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



**Abbildung 27:** Szenario sektorale Abnahme der Moormächtigkeiten in der Randow-Welse-Niederung bis 2060 unter Grünlandnutzung mit mittleren Grundwasserständen von 40 cm u. GOK. Kartengrundlage: DTK 25; HUB Moorarchiv (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).

## 7. Szenarien: CO<sub>2</sub>-Freisetzung Randow-Welse-Niederung

Das erste Szenario zeigt den Status Quo der CO<sub>2</sub>-Freisetzung unter Berücksichtigung der aktuellen Landnutzung (ELLMANN UND SCHULZE 2002). Die Wahl der Landnutzung bestimmt hierbei den mittleren Grundwasserstand der Flächeneinheiten (Anhang A2 - A5). Flächen mit Moormächtigkeiten > 100 cm unter ackerbaulicher Nutzung zeigen die höchsten CO<sub>2</sub>-Freisetzungen, gefolgt von den Flächen mit intensiver Grünlandnutzung (bei niedrigen Grundwasserständen). Die niedrigsten CO<sub>2</sub>-Freisetzungen weisen die extensiven Grünlandflächen mit hohen mittleren Grundwasserständen und Moormächtigkeiten von > 50 cm auf (Abb. 28).

Bei dem zweiten Szenario wurde der Anteil der extensiv genutzten Grünlandfläche Fläche um 30 % erhöht und die Flächen mit intensiver Grünlandnutzung und Ackerbau entsprechend verringert (Abb. 29). Durch die Änderung der Landnutzung kommt es vor allem im nördlichen Bereich der Randow-Welse-Niederung zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung um bis zu 1000 kg CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>.

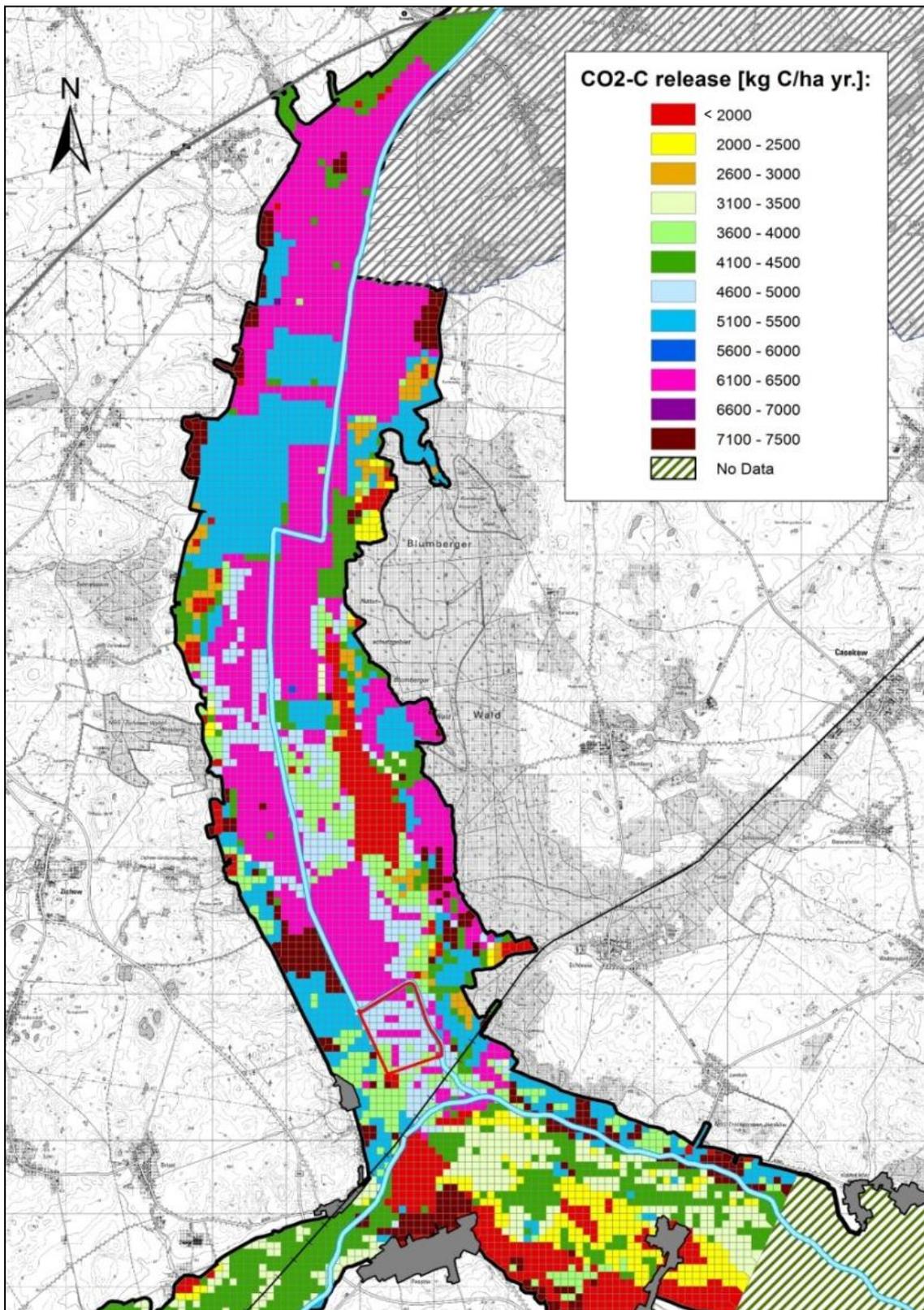
Für eine Teilfläche der Randow-Welse-Niederung von insgesamt 3300 ha wurde die CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei einem mittleren Grundwasserstand von 60 cm und 40 cm berechnet (Tab. 13). Das Szenario zeigt, dass sich durch eine Anhebung der Grundwasserstände um ca. 20 cm die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 1500 t CO<sub>2</sub>-C oder als CO<sub>2</sub><sup>2</sup> ausgedrückt um 5500 t CO<sub>2</sub> pro Jahr reduzieren lassen. Bezogen auf die Gesamtfläche der Randow-Welse-Niederung (ca. 22.000 ha) würde sich dadurch ein CO<sub>2</sub> Einsparpotential von etwa 36500 t CO<sub>2</sub> pro Jahr ergeben.

**Tabelle 13:** Szenario: CO<sub>2</sub>-Freisetzung südliche Randow-Welse-Niederung bei verschiedenen mittleren Grundwasserständen

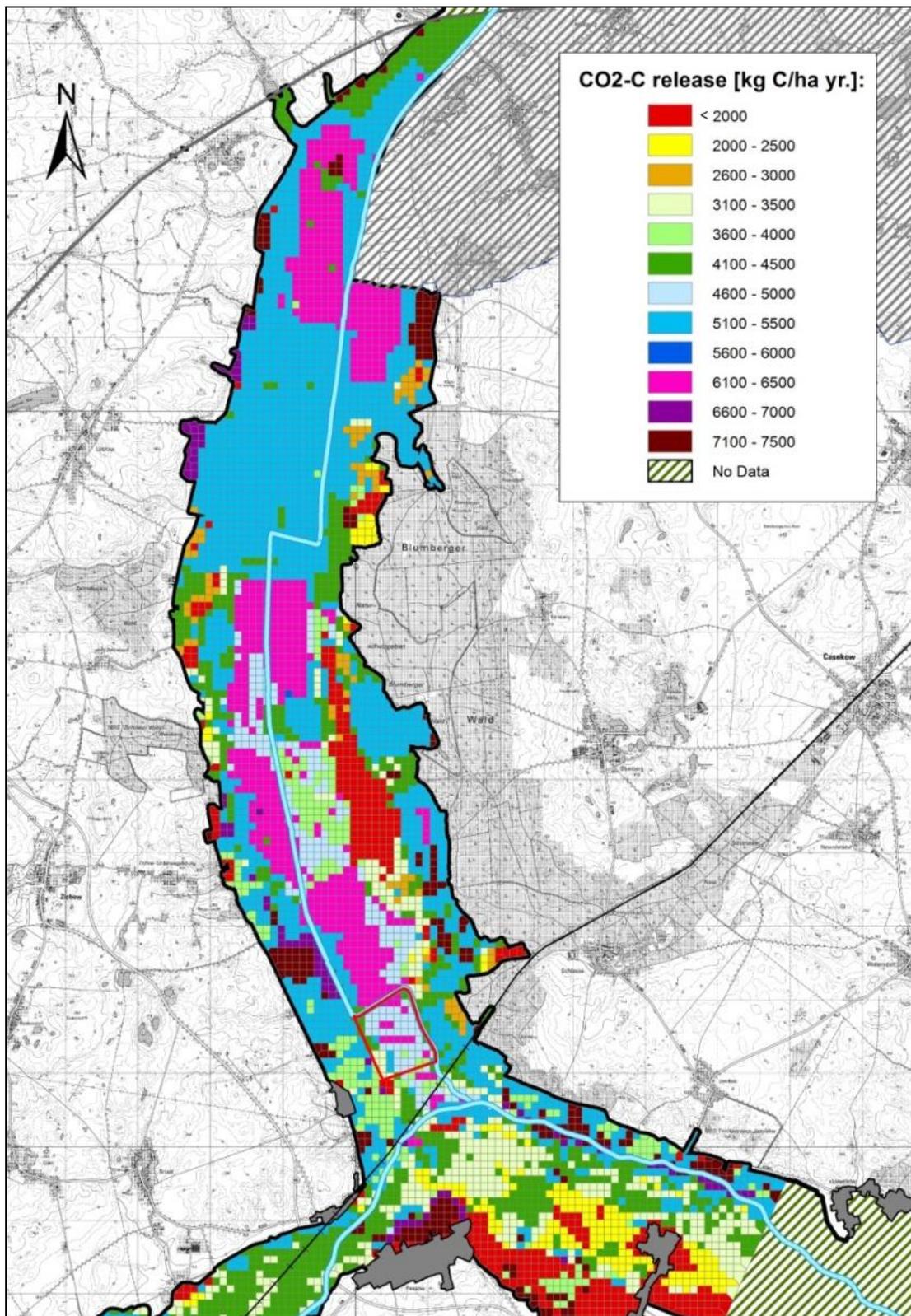
Jahr	Mittlerer Grundwasserstand (cm)	Moormächtigkeit (cm) CO <sub>2</sub> -C Freisetzung (t*a <sup>-1</sup> )				CO <sub>2</sub> -C Freisetzung (t*a <sup>-1</sup> )
		0 - 30 (1)	> 30 - 50 (2)	> 50 - 80 (3)	> 80 (4)	
2012	60	0	1225	2514	13.512	17.251 (5.2)*
	40	0	1086	2336	12.364	15.786 (4.8)*

\* mittlere CO<sub>2</sub>-C Freisetzung in t\*ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

<sup>2</sup> Die Umrechnung von CO<sub>2</sub>-C in CO<sub>2</sub> erfolgt mit dem Faktor 3,67, da sich 12 kg C (Kohlenstoff) mit 32 kg O<sub>2</sub> (Sauerstoff) zu 44 kg CO<sub>2</sub> verbinden.



**Abbildung 28:** Status Quo der CO<sub>2</sub>-Freisetzung der landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Teils der Randow-Welse-Niederung unter Berücksichtigung der Moormächtigkeiten und der Landnutzung. Kartengrundlage: DTK 25/LGB 2012; HUB Moorarchiv; Grundwasser bzw. Nutzungsdaten nach ELLMANN & SCHULZE 2002. (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



**Abbildung 29:** CO<sub>2</sub>-Freisetzung der landwirtschaftlich genutzten Flächen eines Teils der Randow-Welse-Niederung unter Berücksichtigung der Moormächtigkeiten und der Landnutzung unter der Annahme einer Erhöhung der extensiven Grünlandnutzung um 30 %. Kartengrundlage: DTK 25/LGB 2012; HUB Moorarchiv; Grundwasser bzw. Nutzungsdaten nach ELLMANN & SCHULZE 2002. (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).

## 8. Fazit

Die Projektergebnisse zeigen, dass über die Steuerung der Nutzung und des Grundwasserflurabstandes die Torfmineralisation entscheidend beeinflusst werden kann. Je höher der Grundwasserstand ist, umso geringer ist der Torfabbau. Für die Nutzung gilt, dass unter Acker eine höhere CO<sub>2</sub>-Freisetzung als unter Grünland stattfindet. Dies ist auf die ganzjährig tieferen Grundwasserstände und eine stärkere Bodenerwärmung im Frühjahr sowie im Herbst nach der Ernte zurückzuführen. Weitere Gründe sind die Bodenbearbeitung und die damit einhergehende Durchlüftung sowie die Abfuhr der Biomasse vom Feld.

Der Forderung nach möglichst geringen Grundwasserflurabständen sind Grenzen gesetzt, vor allem dann, wenn die Niedermoore landwirtschaftlich genutzt werden sollen. Auch bei einer extensiven Grünlandnutzung sind während der Vegetationsperiode Grundwasserflurabstände von mindestens 30 cm erforderlich, um die Flächen befahren zu können. Selbst bei diesem Grundwasserflurabstand findet bereits eine Torfmineralisation von 1.500 bis 2.000 Kg CO<sub>2</sub>-C\*ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> statt. Daraus ergibt sich, dass ein absoluter Moorerhalt oder sogar ein Moornachwuchs bei der traditionellen landwirtschaftlichen Nutzung nicht möglich ist. Für die Landwirtschaft liegen die optimalen Grundwasserflurabstände für eine hohe Trockenmassebildung bei 40 bis 70 cm; steht dagegen eine Minimierung der Torfmineralisation im Vordergrund, so müssten Grundwasserflurabstände nahe der Bodenoberfläche angestrebt werden. Bei einer gleichrangigen Berücksichtigung von Ertrag, Torfmineralisation und Gasemission und unter der Voraussetzung, dass eine Grünlandnutzung möglich sein soll, ist ein mittlerer Grundwasserflurabstand von 30 cm sinnvoll. Bei diesem Grundwasserflurabstand erreicht man etwa 90 % des optimalen Pflanzenertrages, während die Torfmineralisation auf 30 % bis 40 % der maximalen Torfmineralisation herabgesetzt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass bei niedrigen Grundwasserflurständen (z. B. 30 cm) der Torfabbau zwar minimiert werden kann, aber mit einem Moormächtigkeitungsverlust von 0.5 bis 1.5 mm pro Jahr zu rechnen ist. Dies bedeutet, dass flachgründige Moore von 3 - 4 dm Mächtigkeit innerhalb von 100 Jahren in Anmoor-Gleye oder humose Gleye übergehen werden.

Die Berechnungen ergaben auch, dass sich über eine Anhebung der Grundwasserstände um 20 cm die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich reduzieren lassen könnten. Bezogen auf die Gesamtfläche der Randow-Welse-Niederung (ca. 22.000 ha) würde sich so ein CO<sub>2</sub> Einsparpotential von ca. 36500 t\*CO<sub>2</sub>\*a<sup>-1</sup> ergeben.

Nur wenn man zukünftig Moorflächen aus der landwirtschaftlichen Nutzung herausnehmen und die Grundwasserflurabstände in Höhe der Geländeoberfläche einstellen würde, wäre ein vollständiger Moor- und Naturschutz zu erreichen. Für diese Strategie ist jedoch eine zusätzliche Wasserversorgung von ca. 200 mm während des Sommerhalbjahres notwendig. Einen Teil dieses Wasserbedarfs könnte z.B. durch eine Klarwasserberieselung bereitgestellt werden, wenn diese nach Risikoausschluss auf Niedermoorflächen genehmigt werden würde.

Da die für die gesamte Niedermoorfläche notwendigen Wassermengen in der Regel nicht zur Verfügung stehen, können zumeist nur Teilbereiche vor einem Torfabbau geschützt werden. Dafür sollten vor allem die am wenigsten degradierten, mächtigen Niedermoore genutzt werden.

Methodisch-wissenschaftlich hat diese Modellstudie dazu geführt, dass für die Praxis einfach zu handhabende Nomogramme abgeleitet und bereitgestellt werden konnten, die es erlauben, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einfach zu gewinnenden Flächeninformationen zu Moormächtigkeit und Nutzung abzuleiten. Mit diesen können die Auswirkungen von Nutzungsänderungen und Wassermanagement auch für andere Niedermoorgebiete hinreichend genau abgeschätzt werden.

## 9. Danksagung

Wir danken herzlich Frau Prof. Dr. Jutta Zeitz, Herrn Paul Schulze sowie Evelyn Wallor für ihre freundliche Unterstützung, die Bereitstellung von zahlreichen Informationen und historischen Moormächtigkeitsdaten aus dem HUB Moorarchiv. Ihnen allen sowie Frau Prof. Dr. Vera Luthardt und Frau Claudia Schröder danken wir ebenso für die gute und konstruktive Zusammenarbeit im Teilprojekt 5.

Herrn Prof. Dr. Gunnar Lischeid und Frau Dr. Petra Koepe danken wir für die gut strukturierte ELaN-Projektkoordination. Den Gutachtern danken wir für Ihre Hinweise und Kommentare, die uns geholfen haben, das Manuskript zu verbessern. Herrn Jörg Haberland danken wir herzlich für die freundliche Genehmigung für die Verwendung des Bildes "Moor battery".

## Literaturverzeichnis

- Ad-hoc AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 5. Auflage, Hannover.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., BURMAN, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81, 650-662.
- BERGLUND, Ö., BERGLUND, K., KLEMEDTSSON, L. (2008): A lysimeter study on the effect of temperature on CO<sub>2</sub> emission from cultivated peat soils. *Geoderma* 154, 211-218.
- BRIDGHAM, S.D., RICHARDSON, C.J. (1992): Mechanisms controlling soil respiration (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) in southern peatlands. *Soil Biol. Biochem.* 24, 1089-1099.
- BYRNE, K.A., CHOJNICKI, B., CHRISTENSEN, T.R., DRÖBLER, M., FREIBAUER, A., FRIBORG, T., FROLKIN, S., LINDROTH, A., MAILHAMMER, J., MALMER, N., SELIN, P., TURUNEN, J., VALENTINI, R., ZETTERBERG, L. (2004): EU Peatlands: Current Carbon Stocks and Trace Gas Fluxes, Carbo Europe GHG Concerted Action – Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget. Report 4. Specific Study. ISSN 1723-2236.
- CHIMNER, R.A., COOPER, D.J. (2003): Influence of water table levels on CO<sub>2</sub> emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biol. Biochem.* 35, 345-351.
- COUWENBERG, J., JOOSTEN, H. (2001): Bilanzen zum Moorverlust – Das Beispiel Deutschland. In: SUCCOW, M., JOOSTEN, H.: *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2. Auflage, Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 409-411.
- COUWENBERG, J., AUGUSTIN, J., MICHAELIS, D., JOOSTEN, H. (2008): Emission Reductions from Rewetting of Peatlands. Towards a Field Guide for the Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Central European Peatlands, DUENE Greifswald, 33.
- COUWENBERG, J., THIELE, A., TANNENBERGER, F., AUGUSTIN, J., BÄRISCH, S., DUBOVIC, D., LIASHCHYNSKAYA, N., MICHAELIS, D., MINKE, M., SKURATOVICH, A., JOOSTEN, H. (2011): Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia* 674, 67-89.
- DAVIDSON, E.A., JANSSENS, I.A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440, 165-173.
- DRÖBLER, M. (2005): Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany, Dissertation. TU München.
- DRÖBLER, M., FREIBAUER, A., CHRISTENSEN, T. R., FRIBORG, T. (2008): Observations and status of peatland greenhouse gas emissions in Europe. *Ecol. Studies* 203, 237-256.
- DIN 19684-3:2000-08 (2000): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glührückstands und des Glührückstands.
- DIN 66137-2:2004-12 (2004): Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie
- DIN ISO 11272:2001-01 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte.
- DIN ISO 10694:1996-08 (2008): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) (ISO 10694:1995).
- DIN ISO 17155:2011-06 (2011): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Abundanz und Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven.

- DIN ISO 11274:2012-04 (2012): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren.
- DURNER, W, PETERS, A (2009): Shyffit 2.0 - Software zur Anpassung hydraulischer Funktionen an Messdaten. In: Böden - eine endliche Ressource.
- FEDDES, R.A., KOWALIK, P., KOLINSKA-MALINKA, K., et al., (1976). Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extractant function. *Journal of Hydrology*, 31 (12), 13-26.
- FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D.W., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D.C., MYHRE, G., NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., M., S., VAN DORLAND, R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: S. Solomon et al. (Editors), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- GENSIOR, A., ZEITZ, J. (1999): Einfluss einer Wiedervernässungsmaßnahme auf die Dynamik chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften eines degradierten Niedermoors. In: *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 38, 267-302.
- GRANT, R. F., ROULET, N.T.(2002): Methane efflux from boreal wetlands: Theory and testing of the ecosystem model Ecosys with chamber and tower flux measurements, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1054.
- HAPPELL, J.D., CHANTON, J.P. (1993): Carbon remineralization in a north Florida swamp forest: effect of water level on the pathways and rates of organic matter decomposition. *Global Biochem. Cycles* 7, 475-490.
- HIEDERER, R. (2006): The distribution of peatland in Europe. *Mires and Peat*. Volume 1. Article 01, ISSN 1819-754X.
- HÖLL, B.S.(2007): Die Rolle des Porenraums im Kohlenstoffhaushalt anthropogen beeinflusster Niedermoore des Donaurieds, Dissertation. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte* 79.
- HÖPER, H. (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. *Telma* Band 37, 85-116.
- IEEE Std 442 (1998): IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, USA, 1998.
- IPCC (2000): Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories Published for the IPCC by the Institute for Global Environmental Strategies, Japan.
- IPCC (2004): Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. Published for the IPCC by the Institute for Global Environmental Strategies.
- JOOSTEN, H., CLARKE, D. (2002): The Wise Use of Mires and Peatlands - Background and Principles including a Framework for Decision-making. *International Mire Conservation Group & International Peat Society*, 304.
- KASIMIR-KLEMEDTSSON, A., KLEMEDTSSON, L., BERGLUND, K., MARTIKAINEN, P., SILVOLA, J., OENEMA, O. (1997): Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management* 13, 245-250.
- KECHAVARZI, C., DAWSON, Q., BARLETT, M., LEEDS-HARRISON, P.M. (2009): The role of soil moisture, temperature and nutrient amendment on CO<sub>2</sub> efflux from agricultural peat soil microcosms. *Geoderma* 154, 203-210.
- KLUGE, B. (2003): Moorschwind und C- Verlust von entwässerten Niedermoorböden, dargestellt am Beispiel Radow-Welse-Bruch. Diplomarbeit, TU Berlin.

- KLUGE, B., WESSOLEK, G., FACKLAM, LORENZ, M., SCHWÄRZEL, K. (2008): Long-term carbon loss and CO<sub>2</sub>-C release of drained peatland soils in northeast Germany. *Europ. J. Soil Sc.* 59, 1076-1086.
- KOPPISCH, D. (2001): Kohlenstoffumsetzungsprozesse (Carbon conversion processes). In: SUCCOW, M, JOOSTEN, H. *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2. Auflage, Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 8-17.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, R., GÜNTER, R., SCHWERDTFEGER, G. (1988): *Bodenkunde*, 4. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- LAFLEUR, P.M., MOORE, T.R., ROULET, N.t., FROLKING, S. (2005): Ecosystem Respiration in a Cool Temperate Bog Depends on Peat Temperature But Not Water Table. *Ecosystem* 8: 619-629.
- LAIHO, R., LAINE, J., TRETTIN, C., FINÉR, L. (2004): Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1095-1109.
- LAPPALAINEN, E. (1996): *Global Peat Resources*. International Peat Society, Jyskä, Finland.
- LEIHFELD, J., MÜLLER, M., FUHRER, J. (2011): Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management* 27,170-176.
- LORENZ, M. (2008): Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Bodenwasserhaushalt, Biomasseproduktion und Degradierung von Niedermooren im Spreewald. Dissertation, TU Berlin.
- LGRB (2001): *Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300.000. Kohlenstoffvorräte im Boden*.
- MEYER K., HÖPER H., BLANKENBURG J. (2001): Spurengashaushalt und Klimabilanz bei Vernässung: in R. Kratz und J. Pfadenhauer: *Ökosystemmanagement für Niedermoore. Strategien und Verfahren zur Renaturierung*: Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, S.104-111.
- MUNDEL, G. (1976): Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. *Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 20, 669-679.
- OLESZCZUK, R, R.K, SZAJDAK, L, MARYGANOVA, V (2008): Impacts of agricultural utilization of peat-soil on the greenhouse gas balance. *Plant Soil* 315, 3-17. In: Strack M (ed) *Peatlands and climate change*, International Peat Society, 70-97.
- PARISH, F., SIRIN, A., CHARMAN, D., JOOSTEN, H., MINAYEV, T., SILVIUS, M, STRINGER, L. (2008): *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Kuala Lumpur and Wageningen, Global Environment Centre and Wetlands International.
- PFÜTZNER, B.(2005): *Wasserhaushaltsuntersuchungen im Einzugsgebiet des Lietzengrabens, i.A. der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Ref. Naturschutz IE, Berlin*.
- REICHSTEIN, M, et al. (2003): Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices, *Global Biogeochem. Cycles*, 17(4), 1104.
- RENGER, M., WESSOLEK, G., SCHWÄRZEL, K., SAUERBREY, R., SIEWERT, C. (2002): Aspects of peat conservation and water management. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 487-493.
- RICHTER, A. (2013): *Forecasting the peat subsidence of drained organic soils in North-east Germany*. Master Thesis am Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz. Technische Universität Berlin.
- ROGIERS, N., CONEN, F., FURGER, M., STÖCKLI, R., EUGSTER, W. (2008): Impact of past and present land-management on the C-balance of a grassland in the Swiss Alps. *Global Change Biology* 14, 2613-2625.

- SCHACHTSCHABEL, SCHEFFER, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde; 14., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHMIDT, W. (1981): Kennzeichnung und Beurteilung der Bodenentwicklung auf Niedermoor unter besonderer Berücksichtigung der Degradierung. Institut für Futtermittelproduktion Palinaue.
- SCHWÄRZEL, K., RENGER, M., SAUERBREY R., WESSOLEK, G. (2002): Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 479–486.
- SCHWÄRZEL, K. (2000): Dynamik des Wasserhaushaltes in Niedermooren. Dissertation FG Standortkunde und Bodenschutz, Technische Universität Berlin.
- SCHWÄRZEL, K., Šimunek, J, Martinus, Th., van Genuchten, Wessolek, G. (2006): Measurement and modeling of soil-water dynamics evapotranspiration of drained peatland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 762–774.
- ŠIMUNEK, J., ŠEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M., VAN GENUCHTEN, M.TH.(2008): The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.08, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- STEGEMANN, H., ZEITZ, J. (2001): Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. In SUCCOW M. & H. JOOSTEN (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. 2. Auflage. Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 47-57.
- SUCCOW M., JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. 2.Auflage Verlagsbuchhandlung Stuttgart.
- SUCCOW M., DOERNER H. (1973): Vorbereitungs- und Ausführungsunterlagen – Vorflutausbau Gorin See Wiesen. 3004/10 VE Meliorationskombinat Frankfurt/Oder BI-V-Projektierung.
- TRINKS, S. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Dissertation, TU Berlin.
- UBA (2010): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2008, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2010.
- VON POST, L. (1924): Das Genetische System der Organogenen Bildungen Schwedens (Genetic Classification for the Organic Soils of Sweden). Comité International de Pédologie IV, Communication 22, 287–304 (in German).
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- WECHSUNG, F., A. BECKER, P. GRÄFE - HRSG. (2005): GLOWA-ELBE I - Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, PIK report No 95, pp. 403.
- WERKENTHIN, M. (2012): CO<sub>2</sub>-Freisetzung ausgewählter Moore in Berlin und Brandenburg. Diplomarbeit am Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz. Technische Universität Berlin.
- WESSOLEK, G., ESCHNER, D., FACKLAM, M., RENGER;M., SAUERBREY, R., SCHWÄRZEL, K., SIEWERT, V. (1999): Kennzeichnung der Bodenentwicklungsprozesse in Niedermooren. DFG-Abschlußbericht in Ökologische Hefte 11 der Humboldt-Universität zu Berlin, 96-125.
- WESSOLEK, G., SCHWÄRZEL, K., RENGER, M., SAUERBREY, R., SIEWERT, C. (2002): Soil hydrology and CO<sub>2</sub> mineralization of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 494–500.
- ZEITZ, J., VELTY, S. (2002): Soil properties of drained and rewetted fen soils. *Plant Nutrition and Soil Science*, 165(5), 618–626.

## Quellen aus dem Internet

DWD (2012): Deutscher Wetterdienst (DWD): Zahlen und Fakten zum Klima in Deutschland (DWD):

[http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2011/PK\\_\\_26\\_\\_07\\_\\_11/ZundF\\_\\_PK\\_\\_20110726,templateId=raw,property=publicationFile/pdf/ZundF\\_PK\\_20110726.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2011/PK__26__07__11/ZundF__PK__20110726,templateId=raw,property=publicationFile/pdf/ZundF_PK_20110726.pdf). (10.02.2012)

## Verwendete Datenquellen und Kartenwerke

HUB MOORARCHIV (1964-66/2012): Moormächtigkeitsdaten zum Randow-Welse-Bruch "HU Berlin Moorarchiv" überlassen und für die spezielle Verwendung im ELaN Projekt genehmigt durch Prof. Dr. Jutta Zeitz (Oktober 2012). Humboldt Universität zu Berlin. Datenursprung: Institut für Grünland- und Moorbodenforschung Paulinenaue (1964).

INSTITUT FÜR GRÜNLAND- UND MOORBODENFORSCHUNG PAULINENAUE (1964): Gutachten über das Moorgebiet Randow-Welse, Berlin.

AKADEMIE DER LANDWIRTSSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER DDR (1981): Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK)

ELLMANN & SCHULZE/IFOEN (1999): Institut für Ökologie und Naturschutz (Universität Greifswald): Vorbereitung zur Renaturierung Randow Bruch, unveröffentlichter Bericht.

LUA BRANDENBURG (1999): GIS Daten zur Moormächtigkeit: Editor: S. Haack in Zusammenarbeit mit M. Rösler, C. Unselt & J. Baumgardt. Zur Verfügung gestellt durch J. Thormann (LUGV Brandenburg) (July 2012)

LANDESVERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATION BRANDENBURG (2011): Digitale topographische Karte (DTK 1: 25.000) Uckermark (Projektion: UTRM, Ellipsoid; [GRS80], 01.01.2003, Auflage 2011. Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam.

LBGR BRANDENBURG (2012): Boden- und Umweltinformationen; Moormächtigkeiten; Profil- und Kartierdaten durch Dr. Bauriegel (Juli 2012). Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam.

SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT (2011): Berliner Umweltatlas. Daten zum Grundwasser.

WALLOR, E. (2012): Punktdaten zur Moormächtigkeit Randow-Welse-Niederung erhoben im Rahmen des BMBF Forschungsprogramms INKA BB. Humboldt Universität zu Berlin.

## Abbildungsnachweis

"Moor battery" in More Moor. Dokumentation zu einem internationalen Künstlersymposium. (Hrsg.: Haberland, F. Jörg / Winkler, Insa. Stadtmuseum Oldenburg). Neue Reihe zur aktuellen Kunst. Bd.2, Oldenburg 1993, ISBN 3-89442-146-0

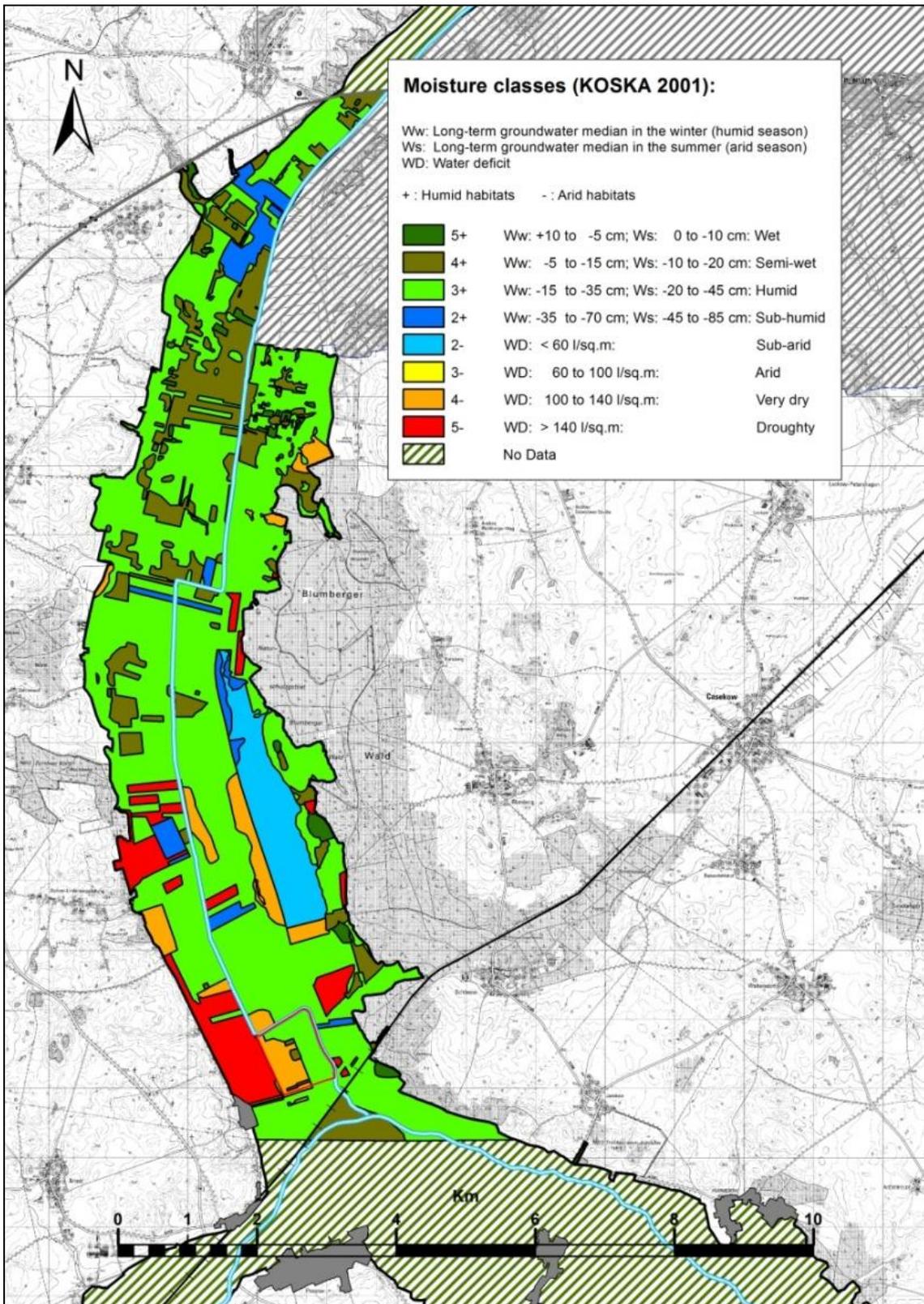


## **Anhang**

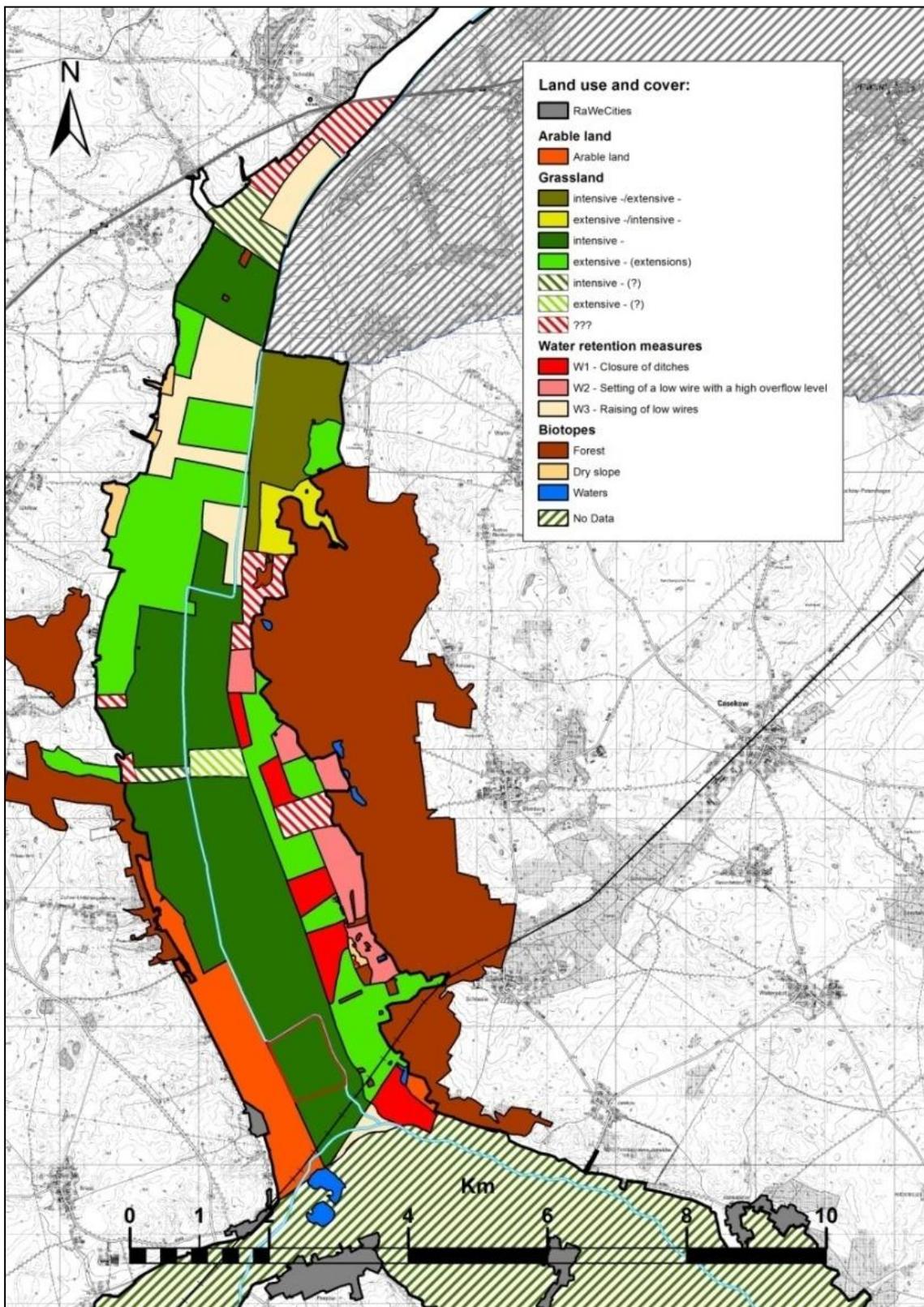


**A 1: Mualem van Genuchten - Parameter für Randow-Welse-Torfe (RAW )**

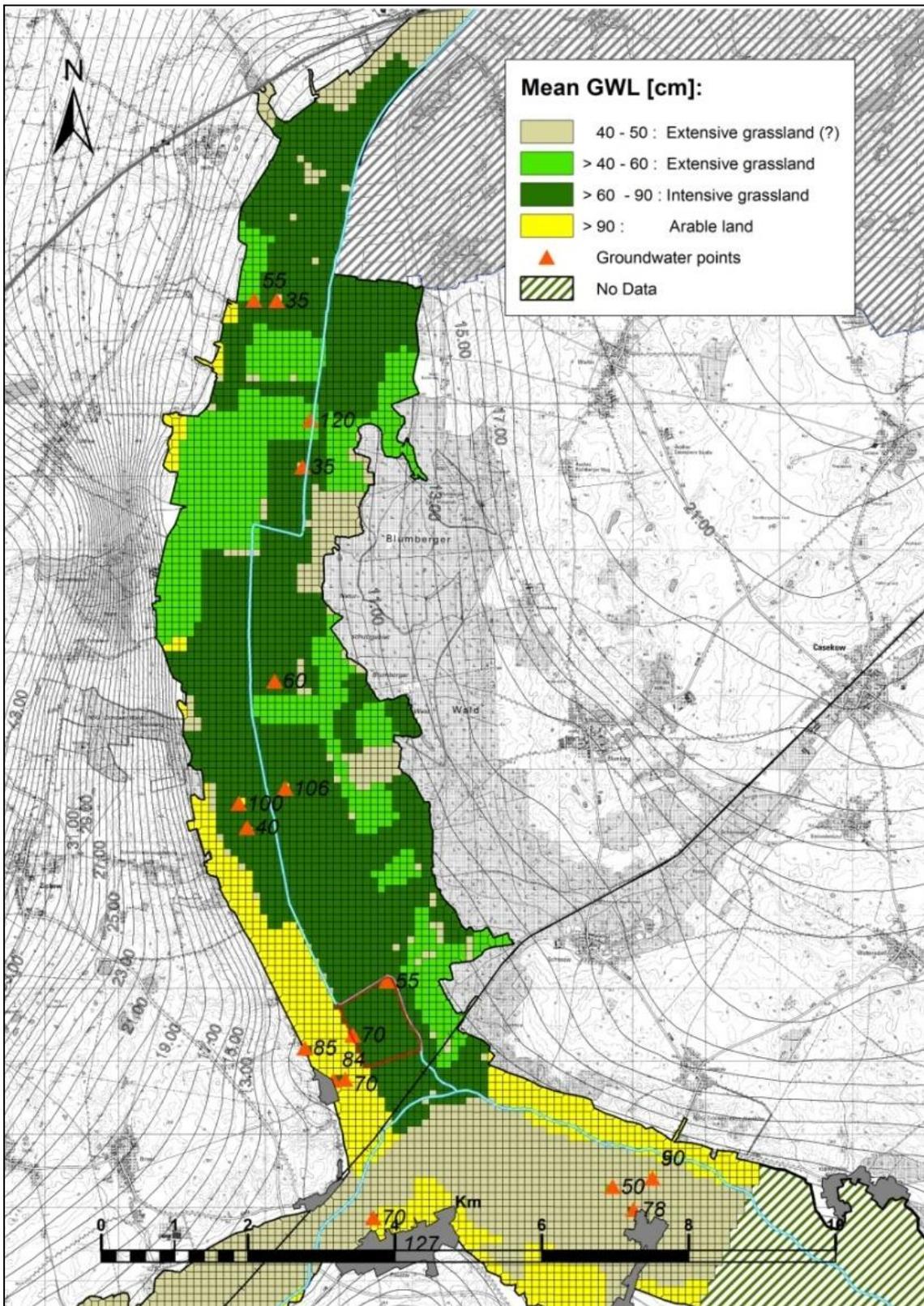
<b>Torfe</b>	<b>Tiefe [cm]</b>	<b>alpha [-]</b>	<b>n [-]</b>	<b>th_r [-]</b>	<b>th_s [-]</b>
<b>RAW MM OB 1</b>	3-22	1.94E-02	1.11E+00	7.81E-08	7.20E-01
<b>RAW MM OB 2</b>	22-36	1.94E-02	1.11E+00	7.81E-08	7.20E-01
<b>RAW MM OB 3</b>	36-43	2.83E-03	1.21E+00	7.90E-08	8.03E-01
<b>RAW MM UB 1</b>	46-59	8.23E-04	1.66E+00	3.91E-08	6.75E-01
<b>RAW MM UB 2</b>	71-91	1.10E-03	1.51E+00	1.95E-07	7.87E-01
<b>RAW MM UB 3</b>	91-93	1.59E-03	1.40E+00	1.32E-07	6.71E-01
<b>RAW MM UB 2</b>	71-91	1.10E-03	1.51E+00	1.95E-07	7.87E-01



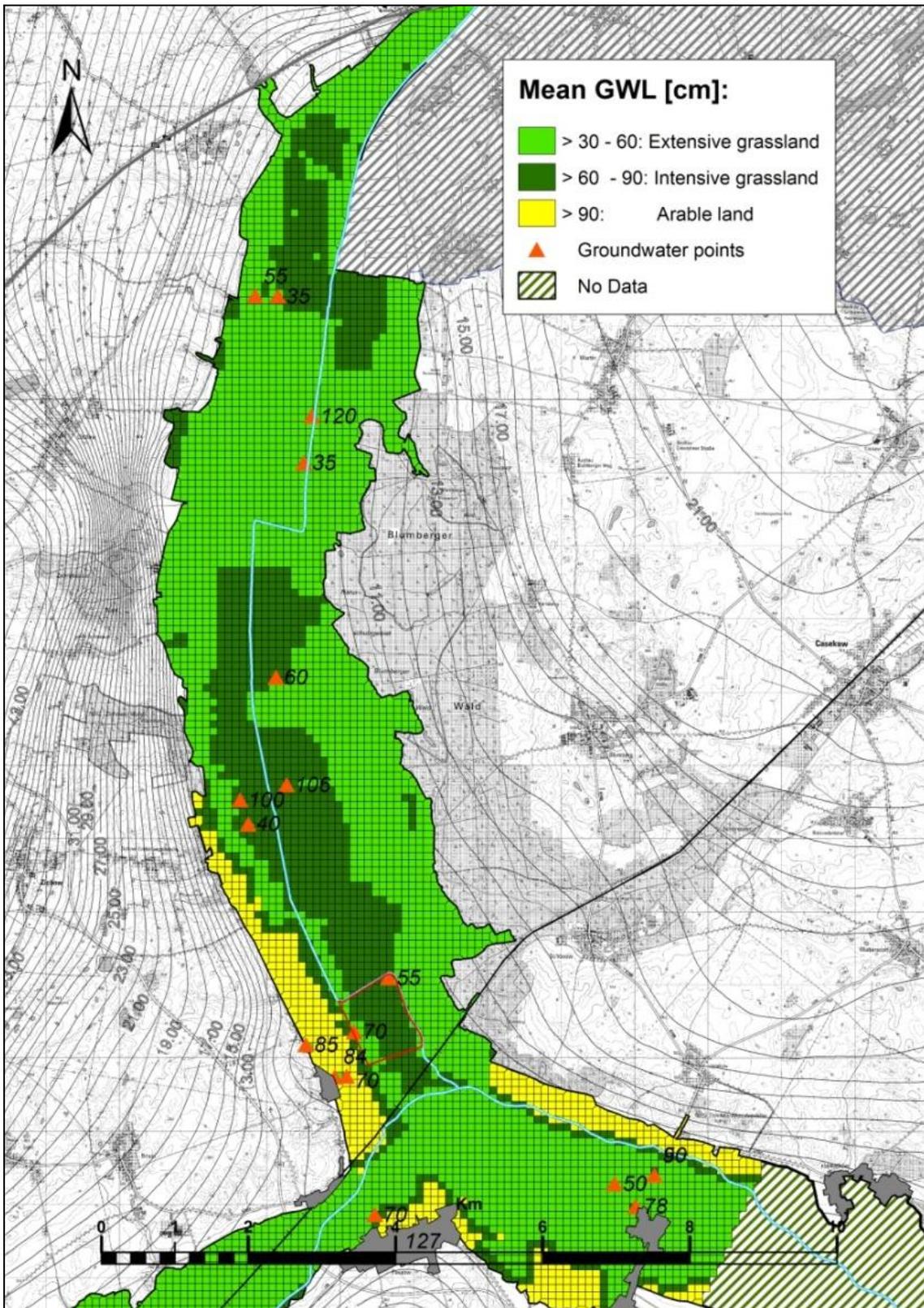
A2: Bodenfeuchteklassen Randow-Welse-Niederung. Daten aus Ellmann & Schultze und LGB (2002) (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



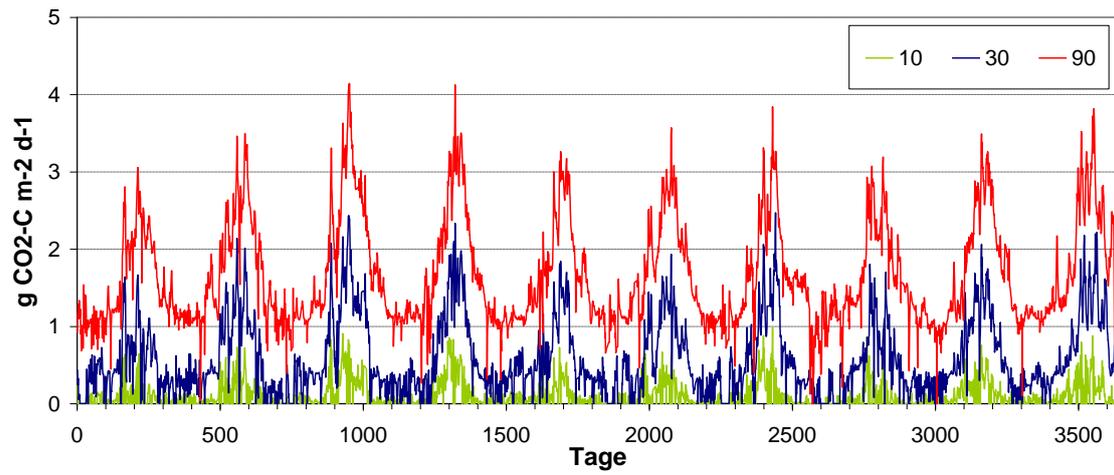
A3: Landnutzung Randow-Bruch (1999). Daten aus ELLMANN & SCHULZE 2002 und LGB 2012  
(Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



A4: Abgeleitete mittlere Grundwasserstände in der Randow-Welse-Niederung aus Bodenfeuchte-  
 klassen und Landnutzungsdaten (2012). Original-Daten siehe A2 und A3. (Farbliche Abbildung  
 siehe pdf-Version).



A5: Abgeleitete mittlere Grundwasserstände in der Randow-Welse-Niederung Bodenfeuchteklassen und Landnutzungsdaten. Szenario: Erhöhung der extensiven Grünlandnutzung um 30 % im Zeitraum 2020-2060. Original-Daten siehe A2 und A3 (Farbliche Abbildung siehe pdf-Version).



A6: Modellierte CO<sub>2</sub>-Freisetzung über einen Zeitraum von 10 Jahren (1980-1989) für das Niedermoorprofil RAW MM unter Grünlandnutzung.

## Herausgeber

Leibniz-Zentrum für  
Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.  
Institut für Landschaftswasserhaushalt

Eberswalder Straße 84  
15374 Müncheberg

[www.elan-bb.de](http://www.elan-bb.de)

Alle Rechte vorbehalten  
Müncheberg, November 2013

ISBN 978-3-943679-10-6 (gebunden)

ISBN 978-3-943679-11-3 (pdf)