

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben **0330562C**
im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts
**Nachhaltige Entwicklung von Waldlandschaften im
Nordostdeutschen Tiefland (NEWAL-NET)**

Zuwendungsempfänger

*Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU)
Abteilung: Wechselwirkungen Atmosphäre-Biosphäre im globalen Wandel
Kreuzeckbahnstraße 19
D-82467-Garmisch-Partenkirchen*

Projektleitung

Prof. Dr. Hans Papen

Mitarbeiter

*Dr. Rainer Gasche, Prof. Dr. Klaus Butterbach-Bahl, Dr. Ralf Kiese,
André Gützloe, Georg Willibald*

Vorhabensbezeichnung

**„Quantifizierung und Bewertung des Klimaschutz- und Nährstoffretentions-
Potentials standortsplastischer Laubmischwälder in einer Modellregion
Nordost-Brandenburgs/Südost-Mecklenburg-Vorpommerns“**

Laufzeit

01.07.2005 bis 31.01.2009

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

6 Untersuchungsstandorte und eingesetzte Methoden

6.1. Untersuchungsstandorte

6.2 Quantifizierung mikrobieller N-Umsetzungen und Parameter

6.3 In situ-Quantifizierung der bodenbürtigen Treibhausgas- (CO_2 , N_2O , CH_4) und NO-Emissionen

6.4 Prozessorientierte Modellierung zur Bestimmung von Gesamt-Treibhausgasbilanzen und Nitrat-Austrägen

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Mikrobielle N-Umsetzungen und Parameter

7.2 In situ-Quantifizierung der bodenbürtigen Treibhausgas- (CO_2 , N_2O , CH_4) und NO-Emissionen

7.3 Prozessorientierte Modellierung zur Bestimmung von Gesamt-Treibhausgasbilanzen und Nitrat-Austrägen: Bewertung der Umsetzung des Leitbildes eines klimaplastischen Laubmischwaldes unter den Gesichtspunkten Klimaschutz und N-Nährstoffretention bei prognostizierten zukünftigen Klimaänderungen (IPCC-Szenarien A1B sowie B1)

8 Zitierte Literatur

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

11 Erfolgte/geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

1 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Zentrale Ziele von Teilprojekt C waren die Quantifizierung der Auswirkungen der Etablierung standortsplastischer Laubmischwälder in der Modellregion Nordost-Brandenburg/Südost-Mecklenburg-Vorpommern auf

- a) ökosystemare Speicherung von C und N in Boden und Bestand
- b) die ökosystemaren C- und N-Umsetzungen unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoff-Retention am Standort sowie
- c) den Austausch klimarelevanter Spurenstoffe (CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x) zwischen Waldökosystemen und der Atmosphäre.

Hierbei sollten insbesondere auch die Auswirkungen der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu erwartenden Änderungen in den Klimabedingungen in der Modellregion auf die internen und externen C- und N-Umsetzungen sowie ibs. auf die ökosystemare N Speicherung berücksichtigt werden.

Diese Ziele des Teilvorhabens sollten durch einen integrierten Forschungsansatz erreicht werden, bei dem punktuelle mikrobiologische Prozessstudien und *in situ* Freilandmessungen zum Gasaustausch zur Weiterentwicklung und Validierung vorhandener prozessorientierter Modelle eingesetzt werden sollten. Durch die Erarbeitung von Gesamt-Treibhausgasbilanzen ($\text{N}_2\text{O}+\text{CH}_4+\text{CO}_2$) für derzeitige und zukünftige Klimabedingungen sollte das Projekt zur Schaffung von Grundlagen zur Umsetzung von Artikel 3.3 und 3.4 des Kyoto-Protokolls (Berichtspflicht, Anrechnung von Waldsenken, Handel mit Emissionsrechten) und zur Evaluation der Nachhaltigkeit von Handlungsoptionen beim Umbau von Wäldern im Nordostdeutschen Tiefland im Hinblick auf den Schutz der Ressource Atmosphäre und somit zum Klimaschutz beitragen.

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung des FZK (IMK-IFU) hatte bereits in der Vergangenheit umfangreiche Vorarbeiten geleistet und die logistischen Voraussetzungen geschaffen, die eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens sicherstellten. So wurden im Rahmen mehrerer durch das BMBF geförderter Projekte (Höglwald, Eberswalde, Spurenstoffkreisläufe) die N- und C-Spurengasflüsse aus Waldböden erfasst sowie die an den N- und C-Emissionen beteiligten mikrobiellen Prozesse identifiziert und quantifiziert (z. B. Papen und Butterbach-Bahl, 1999; Papke und Papen, 1998; Butterbach-Bahl et al., 1997; 1998; Gasche und Papen, 1999) und neue Methoden entwickelt (z. B. Papen und von Berg, 1998; Ingwersen et al., 1999). Die gerade auch im Nordostdeutschen Tiefland erarbeiteten Methoden und Ergebnisse sowie die äußerst erfolgreiche und fruchtbare Zusammenarbeit mit anderen in der Modellregion aktiven Arbeitsgruppen (u.a. Dr. M. Jenssen, Waldkunde-Institut, Eberswalde) schufen weitere sehr günstige Voraussetzungen, um das Projekt erfolgreich durchführen zu können.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in enger Kooperation und Absprache mit dem Koordinator des Verbundprojektes NEWAL-NET, Herrn Dr. Hans-Peter Ende und dem Teilprojekt B (Dr. Martin Jenssen, Waldkunde-Institut Eberswalde) sowie den zuständigen Forstverwaltungen durchgeführt, die Untersuchungsstandorte im Rahmen mehrerer Freilandexkursionen gemeinsam ausgesucht und die Zeitpunkte für die in den Jahren 2006 und 2007 laut Arbeitsplan durchzuführenden jeweils mehrwöchigen Freiland-Messkampagnen zur Erfassung der N- und C-Spurengasflüsse und zur Bestimmung der mikrobiellen N-Umsatzraten gemeinsam festgelegt. Die ausgewählten Untersuchungsstandorte sowie die Zeiträume der Freiland-Messkampagnen können Tabelle 1 entnommen werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Waldökosystemforschung Eberswalde“ wurden bereits erhebliche Vorarbeiten hinsichtlich der Quantifizierung von Spurengasemissionen aus Wäldern des Nordostdeutschen Tieflands geleistet. Eigene Arbeiten (Butterbach-Bahl et al., 2002c) konnten zeigen, dass die Höhe der Emission der primär und sekundär klimarelevanten Spurengase N_2O und NO aus sandigen Böden unter Kiefernreinbeständen im Nordostdeutschen Tiefland positiv mit dem atmosphärischen N-Eintrag korreliert war. Zudem konnten die Autoren zeigen, dass die mittlere Aufnahme

atmosphärischen CH_4 durch Waldböden unter Kiefer durch erhöhte atmogene N-Deposition reduziert werden kann. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch im Rahmen eines BMBF-Projektes zur Auswirkung von Waldumbaumaßnahmen (BMBF-Schwerpunkt „Zukunftsorientierte Waldwirtschaft“) auf die N- und C-Spurengasflüsse im Nordostdeutschen Tiefland erzielt (Papen et al., 2003; 2004). Hier zeigte sich insbesondere, dass durch Waldumbaumaßnahmen und die Etablierung von Kiefern-Buchen-Mischbeständen die N-Retention am Standort gestärkt und die Freisetzung primär und sekundär klimarelevanter Spurengase reduziert werden kann. Da in diese Untersuchung neben Kiefernreinbeständen auch Mischbestände von Kiefer und Buche, Kiefer und Eiche sowie Reinbestände von Buche und Eiche auf Standorten mittlerer Trophie einbezogen waren (Papen et al., 2003; 2004), waren die Ergebnisse dieser Studie direkt als Grundlage für das vorliegende Vorhaben verwendbar. So konnten Papen et al. (2003; 2004) u.a. auch zeigen, dass die Höhe der mikrobiellen Stoffumsetzungen sowie des N- und C-Spurengasaustauschs signifikant vom Bestockungstyp beeinflusst wird, d.h. dass z.B. unter Buchenbestockung die mittleren N_2O -Freisetzungsraten höher sind als aus Böden unter Kiefern- oder Eichenreinbeständen (Papen et al., 2003; 2004). Diese Beobachtung, die auf Auswirkungen von mikroklimatischen Unterschieden und Unterschieden in der Streuqualität auf mikrobielle C- und N-Umsetzungen beruht, werden durch Beobachtungen an anderen Waldstandorten, z.B. in Dänemark, Bayern (Höglwald) oder Sibirien gestützt (Menyailo et al., 2002; Butterbach-Bahl et al., 2002b; Papen und Butterbach-Bahl, 1999). Der von Jenssen et al. (2002a; 2002b) aufgezeigte signifikante Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der Bodenvegetation und der Höhe der N-Spurengasemissionen in verschiedenen Kiefernwaldökosystemen des Nordostdeutschen Tieflands ist ein weiterer Hinweis auf die enge Kopplung pflanzlicher und mikrobieller N- und C-Stoffumsetzungen in Waldökosystemen (siehe auch: Rennenberg et al., 1998; 2001). Desweiteren konnten Papen et al. (2003; 2004) zeigen, dass die Etablierung von Kiefern-Buchen-Mischbeständen mit einer Erhöhung der N-Retention im Ökosystem und einer Reduktion der durch mikrobielle Umsetzungsprozesse verursachten Freisetzung gasförmiger N-Verbindungen (NO , N_2O , N_2) verbunden ist.

Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die Vielzahl von Niederungsgebieten in der Modellregion, die z.T. derzeit landwirtschaftlich genutzt werden oder aber auch mit Niederungswäldern bestockt sind, wesentliche Quellen für die primär klimarelevanten Spurengase CH_4 , CO_2 und N_2O darstellen. Untersuchungen der letzten Jahre hatten gezeigt,

dass insbesondere drainierte Niederungsgebiete mit ihren zumeist sehr Kohlenstoff aber auch Stickstoff reichen Böden, die entweder landwirtschaftlich oder forstlich genutzt werden, extrem starke Flächenquellen für N_2O aber auch CO_2 darstellen können (Rückauf et al., 2004; Augustin et al., 1996; Huttunen et al., 2003; Maljanen et al., 2003), da es durch Drainierung des Bodens zu einer Belüftung und damit zu einer starken Mineralisierung der organischen Substanz kommt. Andererseits können kleinflächige Mooregebiete dominierende, regionale Quellen für atmosphärisches CH_4 darstellen (Roulet, 2000; Sommer et al., 2004).

Die Zusammenstellung zeigt, dass kleinräumige Unterschiede in der Landnutzung (Agrar-versus Forstnutzung, Unterschiede in der Art der Waldnutzung) erheblichen Einfluss auf die Höhe des Spurengasaustausches zwischen der Biosphäre und Atmosphäre nehmen und dass darüber hinaus klimatische (Temperatur, Strahlung, Niederschlag) und hydrologische Faktoren (z.B. Grundwasserabstand) wesentliche Treiber des Spurengasaustauschs sind. Die Vielzahl der die N- und C-Spurengasemissionen aus Böden determinierenden Prozesse und Faktoren (z.B. Williams et al., 1992; Firestone und Davidson, 1989; Butterbach-Bahl et al., 2002b) sind aber auch der Grund für die nach wie vor bestehenden sehr großen Unsicherheiten bei der Abschätzung des Biosphäre-Atmosphäre-Austauschs sowie bei der Prognose künftiger Änderungen des Biosphäre-Atmosphäre-Austauschs aufgrund von Veränderungen der Landnutzung oder des Klimas. Diese Unsicherheiten können nicht allein durch messtechnische Ansätze überwunden werden. Die Lösung dieser Fragestellungen ist nur durch die Entwicklung und Anwendung prozessorientierter Modelle möglich (Li et al., 2000; Stange et al., 2000; Butterbach-Bahl et al., 2001), die es erlauben, den ökosystemaren C- und N-Kreislauf und den daran gekoppelten C- und N-Spurengasaustausch mit der Atmosphäre präzise zu simulieren. Beispiele hierfür sind z.B. die zurzeit am weitest entwickelten Modelle DNDC, CENTURY oder ECOSYS (Li et al., 1992, 2000; Parton et al., 1996; 2001; Grant und Pattey, 2003). Das IMK-IFU ist anerkanntermaßen mit eines der weltweit führenden Institute auf dem Sektor der Entwicklung und Anwendung solcher Modelle z.B. im Rahmen der Erstellung von Emissionsinventaren (Butterbach-Bahl et al., 2001, 2004). Insbesondere das PnET-N-DNDC Modell, welches maßgeblich durch das IMK-IFU in internationaler Kooperation mit Hr. Prof. Dr. C. Li (University of New Hampshire, USA) weiterentwickelt wird, ist zurzeit das einzige Modell weltweit, das durch die Simulation aerober und anaerober Bodenkompartimente in der Lage ist, die komplexen, in den N- und C-Spurengasaustausch involvierten biologischen und physiko-chemischen Prozesse detailliert und realitätsnah zu simulieren (Li et al., 2000; Butterbach-Bahl et al., 2004). Allerdings

benötigt auch dieses Modell eine weitere Validierung und Adaptation einzelner Module zur Verbesserung der prognostischen Fähigkeiten des Modells, u.a. für die Erstellung ökosystemarerer Gesamt-Treibhausgasbilanzen in der ausgewählten Modellregion. Dieses sollte im Rahmen des vorliegenden Projektantrags geleistet werden.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das vorliegende Teilvorhaben war mit allen am Verbundprojekt beteiligten Projekten abgestimmt. Eine besonders enge Abstimmung fand zu den experimental- und modellierungsorientierten Teilprojekten B (Dr. M. Jenssen, Waldkunde-Institut, Eberswalde) und A-c (Dr. H. Jochheim, ZALF, Müncheberg) statt. Zur Erstellung einer GIS-Datenbank wurden die durch das Teilprojekt A-b (Dr. U. Heinrich, ZALF, Müncheberg) aufbereiteten/vorprozessierten Geodaten und Daten zu den Klimaszenarien A1B sowie B1 verwendet. Darüber hinaus trug das vorliegende Teilprojekt wesentlich zur Erreichung der Ziele der dem Bildungsmodul gewidmeten Projekte bei [„Landschaftswerkstatt“ (Dr. K. Anders, Büro für Landschaftskommunikation, Bad Freienwalde) sowie „Bildung und Kommunikation (Dr. T. Aenis, Humboldt Universität, Berlin).

6 Untersuchungsstandorte und eingesetzte Methoden

6.1 Untersuchungsstandorte

Die Lage der im Rahmen des vorliegenden Teilprojekts in der Modellregion untersuchten Waldstandorte „Zichow“, „Weberslinden“, „Postluch“ sowie „Karlswerk“, an denen in den Jahren 2006 und 2007 die mehrwöchigen Freilandmesskampagnen zur Quantifizierung des in situ C- und N-Spuren-gasaustauschs an der Grenzschicht zwischen Pedosphäre und Atmosphäre durchgeführt sowie Bodenproben für die begleitenden umfangreichen Experimente zur Quantifizierung und Parametrisierung der an diesem Austausch beteiligten bodenmikrobiologischen Prozesse entnommen wurden, ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Die Bodenareale, auf denen Messkammern zur Quantifizierung der Spurengas-Flüsse installiert, sowie Bodenproben zur Quantifizierung mikrobiologischer Umsetzungsprozesse entnommen wurden, wurden in engster Abstimmung mit dem Waldkunde-Institut Eberswalde (TP B, Dr. M. Jenssen) nach den Kriterien verschiedener repräsentativer Bodenvegetationsstrukturen bzw. Bestandesstrukturen sowie entlang eines bestehenden Bodenfeuchtegradienten definiert. Diese Untersuchungsklassen waren:

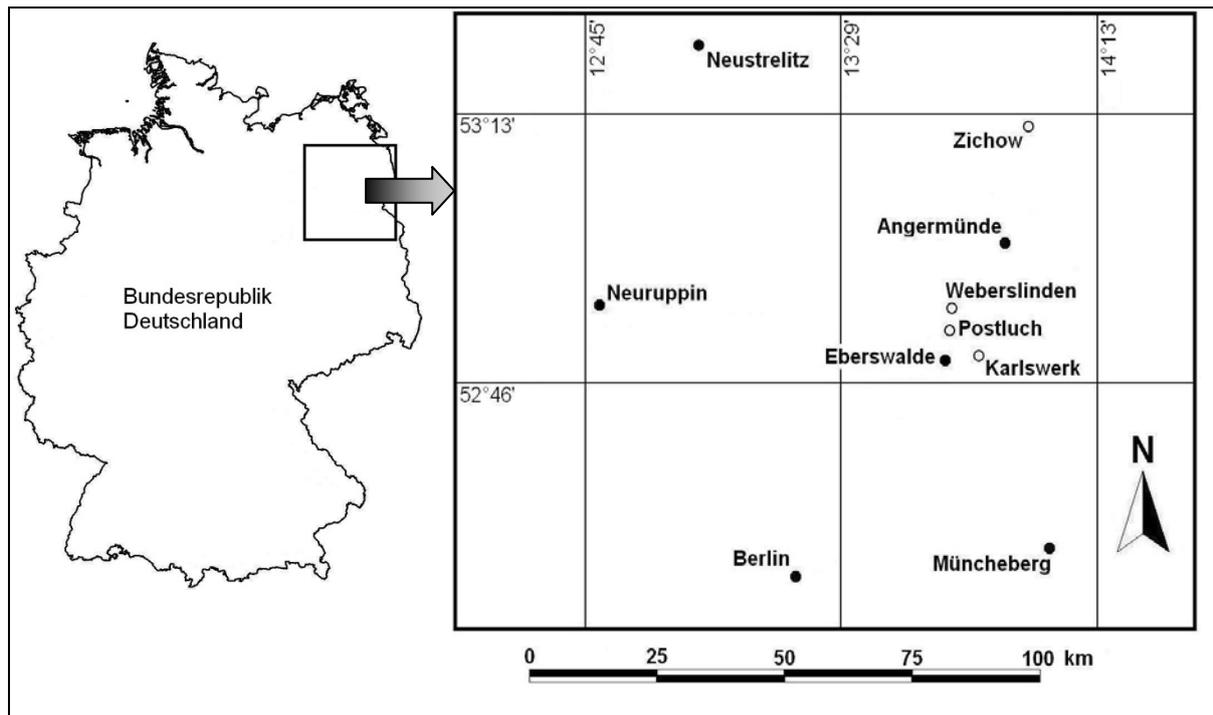


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsstandorte (○) in der Modellregion im nordostdeutschen Tiefland (aus Gützloe, 2009).

Untersuchungsstandort Weberslinden:

- Linden-Buchen-Mischbestand
- Linden-Reinbestand
- Buchen-Reinbestand

Untersuchungsstandort Zichow:

- Hainbuchen-Reinbestand
- Eschen-Feldahorn-Mischbestand
- Hainbuchen-Rotbuchen-Mischbestand
- Hainbuchen-Rotbuchen-Traubeneichen-Mischbestand

Untersuchungsstandort Postluch:

- Schwarzerlen auf Böden geringer Bodenfeuchte (=„trocken“)
- Schwarzerlen auf Böden mittlerer Bodenfeuchte (=„mäßig trocken“)
- Schwarzerlen auf Böden hoher Bodenfeuchte (=„mäßig nass“)
- Schwarzerlen auf Böden höchster Bodenfeuchte (=„nass“)

Untersuchungsstandort Karlswerk:

- Eschen-Pappeln-Mischbestand
- Eschen-Reinbestand
- Eschen-Erlen-Mischbestand

- Erlen-Eschen-Ahorn-Mischbestand
- Ahorn-Eschen-Mischbestand

Die Waldstandorte Zichow und Weberslinden (Tab. 1 und Abb. 2) repräsentieren in ihrer Baumarten-Vielfalt und –Zusammensetzung das Leitbild eines standorts- bzw. klimaplastischen Laubmischwaldtyps auf Böden mittlerer (Weberslinden) bzw. hoher (Zichow) Trophie, während die Waldstandorte Postluch (organische Böden) und Karlswerk (mineralische Böden) dem Typus „Niederungswald“ entsprechen (Tab. 1 und Abb. 2).

Tabelle 1: Allgemeine Charakterisierung der Untersuchungsstandorte sowie Zeiträume der Freiland-Messkampagnen an den Untersuchungsstandorten im nordostdeutschen Tiefland (verändert nach Gützloe, 2009). T_{θ} = Mittlere Jahrestemperatur; N_{θ} = Mittlere jährliche Niederschlagssumme. Für die Berechnung des mittleren Jahresniederschlages [mm] und der mittleren Jahrestemperatur [°C] dienen als Datengrundlagen die Klimamessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Angermünde (DWD-ID: 3058), Grünow (DWD-ID: 3052), Müncheberg (DWD-ID: 3336) und Zehdenick (DWD-ID: 3326). Für die einzelnen Untersuchungsstandorte wurden unter Zuhilfenahme der inversen Distanzengewichtung (Schulla und Jasper, 2000) die Klimadaten interpoliert.

	Untersuchungsstandort			
	Weberslinden	Zichow	Postluch	Karlswerk
Koordinaten				
Latitude	13°49'50''	14°03'29,3''	13°49'50''	13°54'58,32''
Longitude	52°54'7,2''	53°12'25,8''	52°51'52,7''	52°49'25,35''
Zeiträume der Freiland-Messkampagnen	18.07.2006-09.08.2006	20.09.2006-11.10.2006	10.05.2006-01.06.2006	23.05.2007-13.06.2007
Höhe ü. NN [m]	55	65	55	55
T_{θ} [°C]	9,49	9,31	9,49	9,48
N_{θ} [mm]	545,04	483,46	543,90	543,33
Bodentypen	- Braunerde	- Parabraunerde - Kolluvisol	- Auengley - Braunerde	- Auengley - Braunerde
Dominierende Baumarten	- <i>Fagus sylvatica</i> - <i>Tilia cordata</i>	- <i>Acer campestre</i> - <i>Carpinus betulus</i> - <i>Fagus sylvatica</i> - <i>Fraxinus excelsior</i> - <i>Tilia cordata</i> - <i>Quercus petraea</i>	- <i>Alnus glutinosa</i> (dominierend) - <i>Fagus sylvatica</i> (vereinzelt am trockenen Randbereich)	- <i>Alnus glutinosa</i> - <i>Fraxinus excelsior</i> - <i>Populus nigra</i> hybr.
Mächtigkeit der organischen Auflage [cm]	4	2-4	- trockener Randbereich: 3 - Torfschicht: 70-100	< 0,5

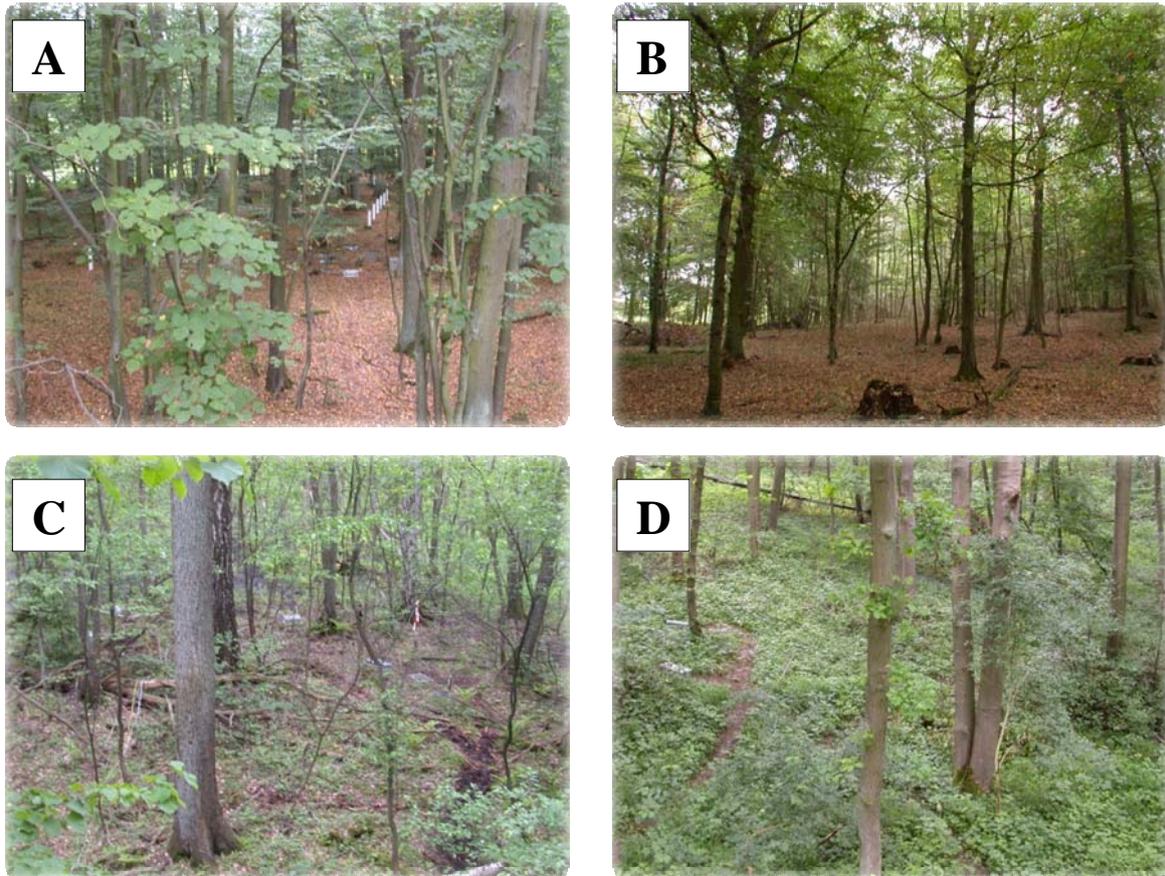


Abbildung 2: Aufnahmen von den Untersuchungsstandorten „Weberslinden“ (A) und „Zichow“ (B), die dem Leitbild eines klimaplastischen Laubmischwaldes entsprechen, sowie „Postluch“ (C) und „Karlswerk“ (D), die Beispiele für Niederungswälder in der Modellregion darstellen (aus Gützloe, 2009).

6.2 Quantifizierung mikrobieller N-Umsetzungen und Parameter

Die zentralen in Böden am N-Kreislauf beteiligten und an der N-Spurengasproduktion und – Emission involvierten bodenmikrobiologischen Prozesse sind in Abbildung 3 veranschaulicht.

Zur Quantifizierung der Brutto-Ammonifikations-, der Brutto-Nitrifikations- sowie der Ammonium- und Nitrat-Immobilisierungsraten in den Böden der Untersuchungsstandorte wurde die ^{15}N -Pool-Dilution-Technique eingesetzt (Kirkham und Bartholomew, 1954; Davidson et al., 1991; Barraclough et al., 1995; Geßler et al., 2005; Dannenmann et al., 2006; Rosenkranz et al., 2006). Diese Methode wurde auch angewandt für die - zur Weiterentwicklung des prozessorientierten Modells FOREST-DNDC (siehe auch 6.4) erforderlichen - Parametrisierungsversuche zur Bestimmung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit dieser Brutto-N-Umsatzraten und der an sie gekoppelten N_2O - und NO -Emissionen.

Die Bestimmung der Veränderungen der mikrobiellen Biomasse im Boden der Untersuchungsstandorte wurde mittels Fumigations-Extraktionstechnik durchgeführt (z.B. Vance et al., 1987). Die Bestimmung der Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen in Boden-KCl-Extrakten erfolgte über kolorimetrische Standard-Verfahren.

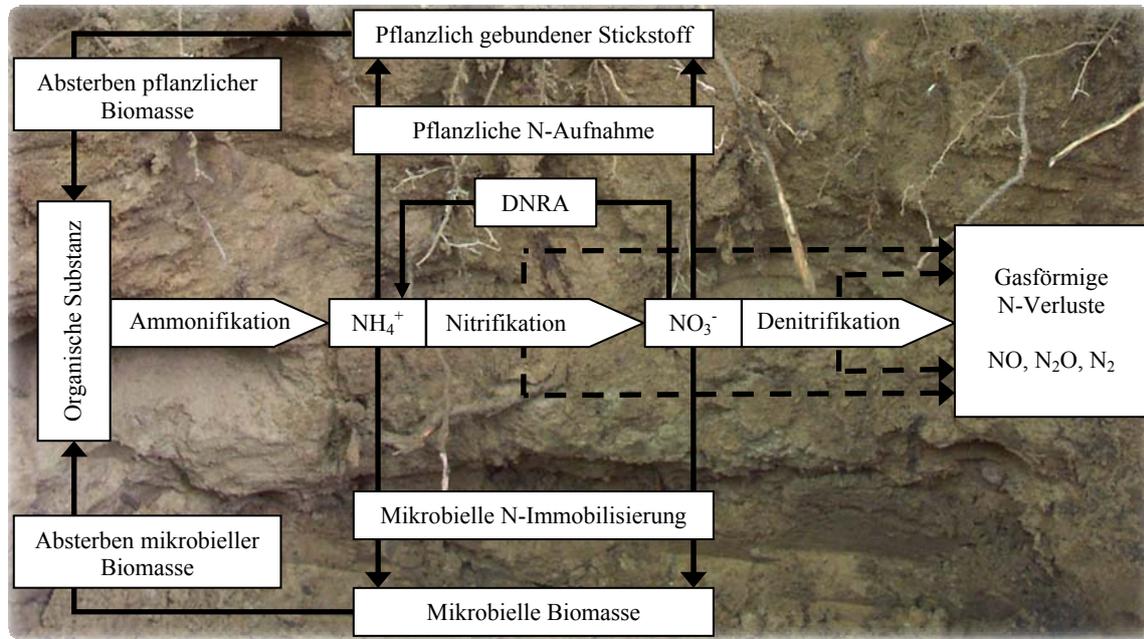


Abbildung 3: Zusammenfassende Darstellung der N-Umsetzungsprozesse in Waldböden und der über Nitrifikation und Denitrifikation modulierten gasförmigen N-Verluste (N_2O , NO , N_2). DNRA: Dissimilatorische Nitrat-Reduktion zu Ammonium (aus Gützloe, 2009).

6.3 In situ-Quantifizierung der bodenbürtigen Treibhausgas- (CO_2 , N_2O , CH_4) und NO -Emissionen

Die in-situ Quantifizierung der bodenbürtigen Treibhausgas- und NO -Emissionen aus dem Boden der einzelnen Untersuchungsstandorte Weberlinden, Zichow, Postluch und Karlswerk wurden im Untersuchungszeitraum 2006-2007 mit vollautomatisch arbeitenden Messsystemen (untergebracht in einem Mess-LKW) in jeweils mehrwöchigen Meßkampagnen (siehe Tabelle 1) in hoher zeitlicher Auflösung erfasst, wobei für die Erfassung der N_2O -, CO_2 - und CH_4 -Flussraten die „closed chamber technique“ (8 Messkammern), zur Erfassung der NO - und NO_2 -Flussraten die „dynamic chamber technique“ (5 Messkammern) eingesetzt wurde (Abbildung 4). Die Details der Methodiken sind ausführlich in vielen eigenen Publikationen dargestellt (Papen und Butterbach-Bahl, 1999; Gasche und Papen, 1999; Butterbach-Bahl und Papen, 2002; Butterbach-Bahl et al., 1997; Gasche und Papen, 2002; Butterbach-Bahl et al., 2002a; Gützloe, 2009).

Die Bodenareale, auf denen die Meßkammern installiert wurden, wurden in engster Abstimmung mit dem Waldkunde-Institut Eberswalde (TP B, Dr. M. Jenssen) nach den Kriterien verschiedener repräsentativer Bodenvegetationsstrukturen bzw. Bestandesstrukturen sowie entlang eines bestehenden Bodenfeuchtegradienten definiert (s.o. 6.1).

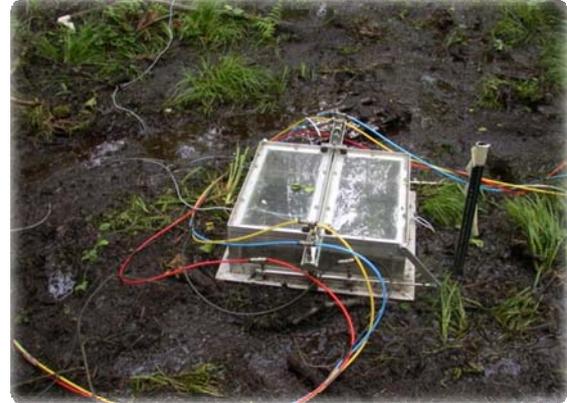


Abbildung 4: Mess-LKW des IMK-IFU am Untersuchungsstandort „Zichow“ sowie automatische Messkammer zur Bestimmung der N_2O -, CH_4 - und CO_2 -Flußraten zwischen Pedosphäre und Atmosphäre am Untersuchungsstandort „Postfluch“ (aus Gützloe, 2009).

6.4 Prozessorientierte Modellierung zur Bestimmung von Gesamt-Treibhausgasbilanzen und Nitrat-Austrägen

Zur Simulation und Prognose von Gesamt-Treibhausgasbilanzen und Nitrat-Austrägen unterhalb der Wurzelzone wurden Module aus dem gekoppelten Modellsystem MoBiLE (**M**odular **B**iosphere **S**im**L**ation **E**nvironment, Abb. 5), das FOREST-DNDC (Abb. 6), nach entsprechender Adaptation ausgewählt. Die Adaptationen des Modells erfolgten auf Grundlage der umfangreichen Ergebnisse aus den Labor-Parametrisierungsversuchen der Abhängigkeit der bodenmikrobiologischen N-Umsetzungsprozesse von Bodentemperatur und Bodenfeuchte sowie auf Grundlage der Ergebnisse aus den in-situ Parametrisierungen der Abhängigkeit der in-situ CO_2 -, CH_4 -, N_2O - und NO-Flussraten von in-situ Bodentemperatur und Bodenfeuchte.

Die Validierung des adaptierten Modells FOREST-DNDC erfolgte einerseits durch Simulation des Spurengas-Austauschs für die im Rahmen dieses Teilprojekts beprobten Freiland-Untersuchungsflächen sowie andererseits unter Verwendung zusätzlicher unabhängiger Validierungsdatensätze aus Freiland-Messreihen zu Treibhausgas-Emissionen einer Vielzahl europäischer Waldstandorte (Untersuchungsflächen des EU-Projekts NOFRETETE, siehe u.a. Kesik et al., 2005).

Als zentraler Modelltreiber für die Validierungssimulationen zu den Treibhausgas-Emissionen aus den Böden der untersuchten Waldstandorte in der Modellregion wurden die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Jahre 2004 bis 2006 verwendet.

Für die Simulation der Auswirkungen zukünftiger prognostizierter Klimaänderungen in der Modellregion auf die Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen sowie den Nitrat-Austrag unterhalb der Wurzelzone wurden als Treiber für FOREST-DNDC die für die Modellregion unter Anwendung des regionalen Klimamodells REMO (REMO-Daten: Jacob, 2005a; b) prognostizierten Klimadaten der IPCC-Klimaszenarien A1B sowie B1 für die Simulationszeiträume 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100, auf die sich der Projektverbund verständigt hatte, eingesetzt. Die Klimadaten wurden von Teilprojekt A-b (Dr. U. Heinrich, ZALF, Müncheberg) aufbereitet und dem Projektverbund zentral zur Verfügung gestellt.

Für die Simulation der Auswirkungen der Umsetzung des Leitbilds zur Etablierung klimaplastischer Laubmischwälder (=Landnutzungsszenarien) auf die Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen sowie den Nitrat-Austrag unterhalb der Wurzelzone wurden unter Anwendung o.a. Klimaszenarien A1B und B1 die Landnutzungsszenarien „Business As Usual“ (=Fortschreibung der bisherigen forstlichen Nutzung) sowie „Klimaplastisch Optimiert“ (=Umsetzung des Leitbildes zur Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder) eingesetzt. Die Daten zu den Landnutzungsszenarien wurden von Teilprojekt B (Dr. M. Jenssen, Waldkunde-Institut Eberswalde) für die Jahre 2006, 2020, 2040, 2060, 2080 und 2100 erstellt und dienten dem gesamten Projektverbund als Startwerte für ihre jeweiligen Simulationszeiträume. Im Rahmen des vorliegenden Teilprojekts wurden diese Daten zu den Landnutzungsszenarien als Eingangsparameter für die Simulationszeiträume 2005-2014, 2048-2057 und 2091-2100 mit dem Modell FOREST-DNDC genutzt.

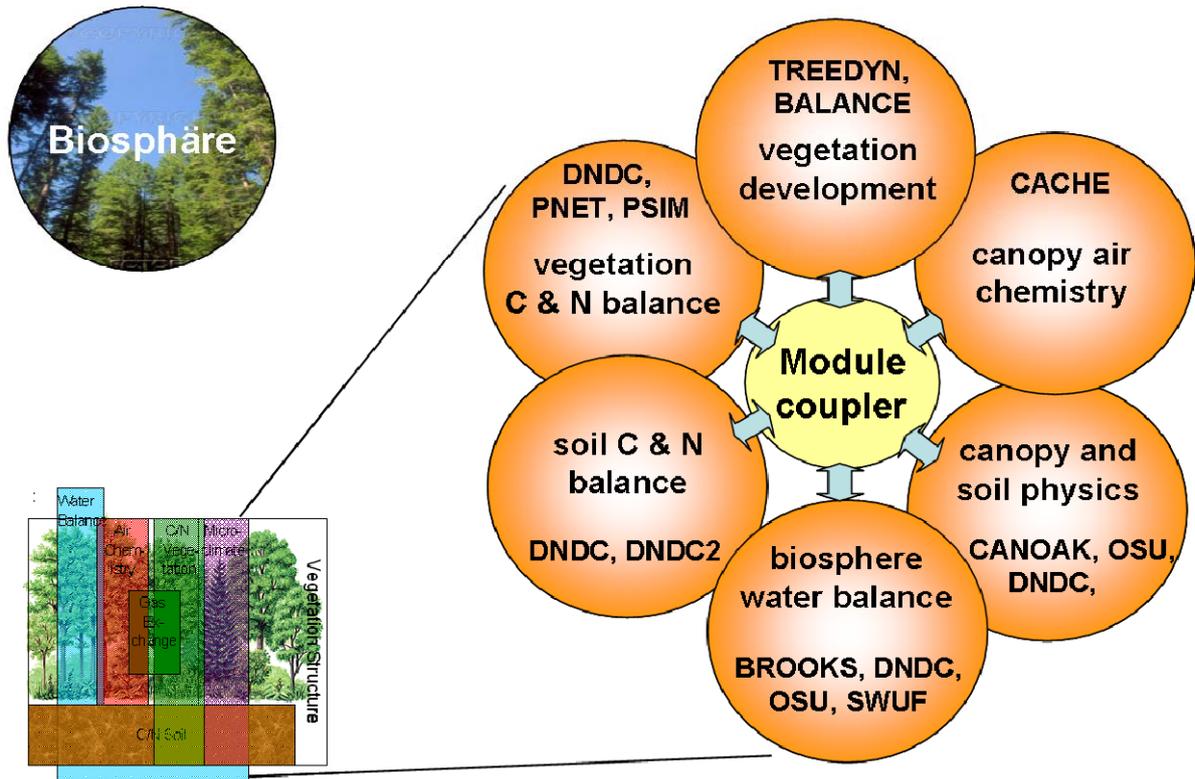


Abbildung 5: Schematische Darstellung des modularen Aufbaus des gekoppelten Modellsystems MoBiLE (Modular Biosphere SimuLation Environment) (Grote, 2008).

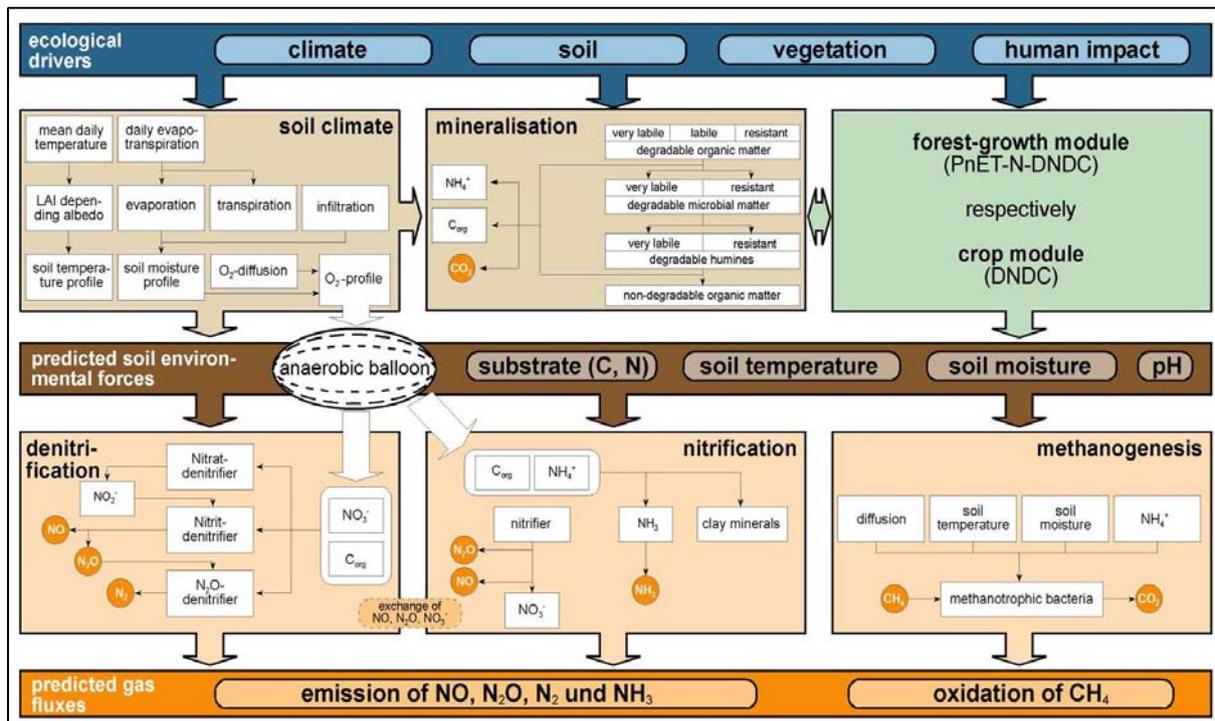


Abbildung 6: Schematische Darstellung des prozess-orientierten Modells FOREST-DND.

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Mikrobielle N-Umsetzungen und Parameter

Die Ergebnisse aus den umfangreichen Untersuchungen zu den mikrobiellen N-Umsetzungen im Böden der Untersuchungsstandorte und deren Untersuchungsklassen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Baumartenzusammensetzung einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der mikrobiellen N-Umsetzungen im Boden nimmt. So konnte z.B. für den Untersuchungsstandort „Weberslinden“ gezeigt werden, dass die Höhe der Brutto-Ammonifikationsrate für die ausgewählten Untersuchungsklassen zwischen $0.67 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Buchenreinbestand) und $2.12 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Linden-Buchen-Mischbestand) variiert, für den Untersuchungsstandort „Zichow“ zwischen $0.15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Eschen-Feldahorn-Mischbestand) und $0.48 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Hainbuchen-Reinbestand). Mit Ausnahme der Untersuchungsklasse „trocken“ (ein Rotbuchen-Schwarzerlen-Mischbestand) am Untersuchungsstandort „Postluch“, der ansonsten durch reine Schwarzerlen gekennzeichnet ist, zeigten die Untersuchungsklassen sowohl in „Zichow“ wie auch „Weberslinden“ deutlich höhere Brutto-Nitrifikationsraten. Diese Aussage trifft im wesentlichen auch auf die Brutto-Ammonifikationsraten zu. Die Unterschiede dürften im wesentlichen darin zu suchen sein, dass die Böden der Standorte „Zichow“ und „Weberslinden“ aufgrund des höheren Grundwasserabstands besser durchlüftet sind und durch die aeroben Bedingungen die Prozesse Ammonifikation wie ibs. Nitrifikation gefördert werden, während in den Böden der untersuchten Standorte in Postluch und Karlswerk anaerobe Bedingungen vorherrschten, die sich negativ auf die Höhe dieser N-Umsatzraten auswirkten.

Die Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass die relative N-Retention (= der Quotient aus $(\text{NH}_4^+ \text{-Immobilisierung} + \text{NO}_3^- \text{-Immobilisierung}) / (\text{Brutto-Ammonifikation} + \text{Brutto-Nitrifikation})$) in den Böden der Untersuchungsklassen an den Standorten „Zichow“ und „Weberslinden“, die dem Leitbild eines standortoptimierten/klimaplastischen Laubmischwalds entsprechen, für aerobe Böden mit hoher Nitrifikationsleistung sehr gut ausgeprägt ist (Tabelle 2). Immerhin werden hier noch - unter den vorherrschenden aeroben Bedingungen - bis zu 75 % des mineralisierten anorganischen Stickstoffs ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) im System wieder immobilisiert (z. B. in der mikrobiellen Biomasse), was zumindest größere Verluste von Nitrat unterhalb der Wurzelzone unwahrscheinlich macht und somit einerseits der N-Retention am Standort wie andererseits gleichzeitig dem Schutz der Ressource Hydrosphäre förderlich ist.

Tabelle 2: Brutto-N-Umsatzraten und $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ -Immobilisierung [$\text{kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$], $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ Konzentration und mikrobieller Biomasse-N [kg N ha^{-1}] sowie relative N-Retention [$(\text{NH}_4^+\text{-Immobilisierung} + \text{NO}_3^-\text{-Immobilisierung}) / (\text{Brutto-Ammonifikation} + \text{Brutto-Nitrifikation})$] [%] im Boden. Indices (a-d: signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsklassen ($p < 0,05$); Ergebnisse: Mittelwert \pm Standardfehler (aus Gützloe, 2009).

Standort	Untersuchungsklasse	Brutto-Ammonifikationsrate	NH_4^+ -Immobilisierungsrate	Brutto-Nitrifikationsrate	NO_3^- -Immobilisierungsrate	NH_4^+ -Konzentration	NO_3^- -Konzentration	Mikrobieller Biomasse-N	Relative N-Retention
Weberslinden	Linden-Buchen-Mischbestand	$2,12 \pm 0,25^a$	$1,28 \pm 0,22^a$	$0,59 \pm 0,03^a$	$0,13 \pm 0,02^a$	$1,92 \pm 0,09^a$	$0,98 \pm 0,09^a$	$104,13 \pm 1,51^a$	$52,1^{ab}$
	Linden-Reinbestand	$1,30 \pm 0,14^b$	$0,94 \pm 0,17^{ab}$	$0,78 \pm 0,10^a$	$0,44 \pm 0,08^b$	$2,49 \pm 0,14^a$	$3,96 \pm 0,23^b$	$108,32 \pm 1,86^a$	$66,1^a$
	Buchen-Reinbestand	$0,67 \pm 0,02^c$	$0,42 \pm 0,08^b$	$0,67 \pm 0,04^a$	$0,24 \pm 0,04^b$	$1,20 \pm 0,06^b$	$1,08 \pm 0,08^a$	$88,12 \pm 1,01^b$	$48,4^b$
Zichow	Hainbuchen-Reinbestand	$0,48 \pm 0,03^a$	$0,43 \pm 0,05^a$	$0,39 \pm 0,01^a$	$0,23 \pm 0,10^a$	$1,72 \pm 0,07^a$	$1,70 \pm 0,14^a$	$41,51 \pm 1,18^a$	$75,5^a$
	Hainbuchen-Rotbuchen-Trauben-Eichen-Mischbestand	$0,74 \pm 0,08^b$	$0,21 \pm 0,06^b$	$0,78 \pm 0,19^a$	$0,37 \pm 0,13^a$	$1,82 \pm 0,04^b$	$4,70 \pm 0,37^b$	$46,95 \pm 2,98^a$	$38,1^b$
	Eschen-Feldahorn-Mischbestand	$0,15 \pm 0,02^c$	$0,02 \pm 0,02^b$	$0,21 \pm 0,02^b$	$0,16 \pm 0,03^a$	$0,55 \pm 0,02^b$	$2,12 \pm 0,22^a$	$58,54 \pm 1,15^b$	$49,2^{ab}$
Postluch	Trockene Boden-Feuchtekategorie	$3,05 \pm 0,30^{a*}$	$3,55 \pm 0,96^{a*}$	$0,99 \pm 0,16^{a*}$	$1,32 \pm 0,27^{a*}$	$6,34 \pm 0,74^{a*}$	$9,50 \pm 1,12^{a*}$	$91,53 \pm 4,02^{a*}$	$120,4^{a*}$
	Mäßig nasse Boden-Feuchtekategorie	$0,32 \pm 0,03^b$	$0,26 \pm 0,02^b$	$0,00 \pm 0,00^b$	$0,00 \pm 0,00^b$	$0,83 \pm 0,08^b$	$0,01 \pm 0,00^b$	$18,89 \pm 0,68^b$	$82,4^a$
	Mäßig trockene Boden-Feuchtekategorie	$0,78 \pm 0,07^c$	$0,63 \pm 0,12^c$	$0,02 \pm 0,01^c$	$0,06 \pm 0,01^c$	$0,47 \pm 0,02^c$	$0,03 \pm 0,00^c$	$27,62 \pm 0,40^c$	$85,4^a$
Karlswerk	Eschen-Pappeln-Mischbestand	$0,24 \pm 0,02^a$	$0,23 \pm 0,05^a$	$0,24 \pm 0,02^a$	$0,36 \pm 0,06^{ac}$	$0,25 \pm 0,01^a$	$0,86 \pm 0,00^a$	$46,24 \pm 1,22^a$	$124,2^a$
	Eschen-Erlen-Mischbestand	$0,30 \pm 0,03^a$	$0,16 \pm 0,03^a$	$0,30 \pm 0,05^a$	$0,44 \pm 0,10^a$	$0,10 \pm 0,00^{bc}$	$0,36 \pm 0,01^b$	$37,46 \pm 0,39^b$	$100,9^a$
	Erlen-Eschen-Ahorn-Mischbestand	$0,25 \pm 0,03^a$	$0,08 \pm 0,03^b$	$0,23 \pm 0,05^a$	$0,05 \pm 0,02^b$	$0,11 \pm 0,00^c$	$1,04 \pm 0,00^c$	$58,05 \pm 0,35^c$	$27,6^b$
	Ahorn-Eschen-Mischbestand	$0,44 \pm 0,03^b$	$0,37 \pm 0,03^c$	$0,30 \pm 0,04^a$	$0,20 \pm 0,04^c$	$0,11 \pm 0,00^{cd}$	$0,39 \pm 0,00^d$	$63,41 \pm 0,90^d$	$77,2^a$

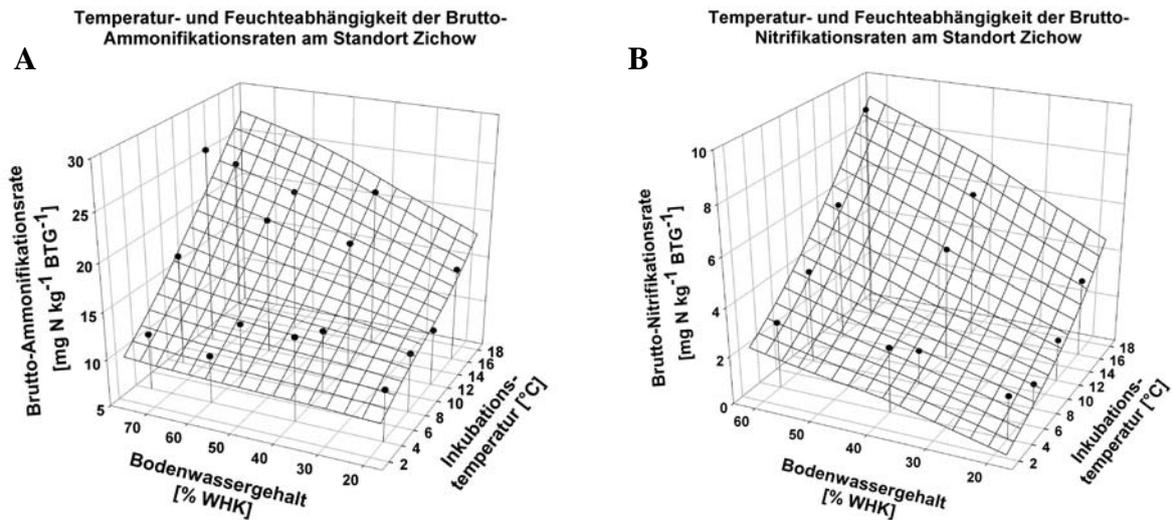


Abbildung 7: Multiple Regressionsmodelle zur Charakterisierung der Abhängigkeit der Ammonifikationsraten (A) sowie der Nitrifikationsraten (B) von Bodenwassergehalt [% WHK] und der Inkubationstemperatur [°C] des oberen Mineralbodens am Untersuchungsstandort „Zichow“ zur Adaptation des prozess-orientierten Modells FOREST-DNDC (aus Gützloe, 2009).

Tabelle 3: Multiple polynomische Formel zur Berechnung der Brutto-Ammonifikationsraten ($\text{Br-Amm}_{\text{Min}}$) und der Brutto-Nitrifikationsraten ($\text{Br-Nitr}_{\text{Min}}$) des Mineralbodens in Abhängigkeit von der Bodentemperatur (B_t) [°C] und der Wasserhaltekapazität (WHK) [%] am Untersuchungsstandort „Zichow“ zur Adaptation des prozess-orientierten Modells FOREST-DNDC (aus Gützloe, 2009).

Brutto-Rate = $a + b \cdot B_t + c \cdot \text{WHK} + d \cdot B_t^2 + e \cdot \text{WHK}^2 + (f \cdot B_t / \text{WHK})$							
	a	b	c	d	e	f	r^2
$\ln \text{Br-Amm}_{\text{Min}}$	2,53	0,09	-0,01	$-8,03^{-5}$	$1,31^{-4}$	-1,32	0,787
$\ln \text{Br-Nitr}_{\text{Min}}$	6,33	-0,07	-0,17	0,04	$2,07^{-3}$	-10,94	0,892

$r^2 = \text{Bestimmtheitsmaß}$

Die Untersuchungen zur Parametrisierung der in die N-Spurengasemission und Nitratproduktion involvierten mikrobiellen Prozesse Brutto-Ammonifikation und Brutto-Nitrifikation von den abiotischen Parametern Bodentemperatur und Bodenfeuchte wurden für den klimaplastischen Laubmischwaldtypus an Bodenproben des Untersuchungsstandorts „Zichow“ durchgeführt, um multiple polynome Regressionsmodelle abzuleiten, die für die Adaptation des prozessorientierten Modells FOREST-DNDC genutzt werden sollten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 und Tabelle 3 wiedergegeben.

Die Abbildung 7 zeigt, dass die Höhe sowohl der Brutto-Ammonifikationsrate als auch der Brutto-Nitrifikationsrate bei niedrigen Inkubationstemperaturen allenfalls nur sehr geringfügig durch Variationen in der Bodenfeuchte beeinflusst wird. Mit steigender Inkubationstemperatur nimmt der Einfluss des Bodenwassergehalts sowohl auf die Brutto-

Ammonifikationsrate wie auch Brutto-Nitrifikationsrate deutlich zu. Aus diesen umfangreichen Datensätzen wurden letztendlich die in Tabelle 3 wiedergegebenen multiplen polynomischen Regressionsmodelle zur Beschreibung der Abhängigkeit dieser Brutto-N-Umsatzraten abgeleitet (Tabelle 3).

7.2 In situ-Quantifizierung der bodenbürtigen Treibhausgas- (CO_2 , N_2O , CH_4) und NO -Emissionen

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur in-situ Quantifizierung der bodenbürtigen Emissionen der Treibhausgase CO_2 , N_2O und CH_4 sowie des sekundär klimawirksamen Spurengases NO an den Untersuchungsstandorten „Weberslinden“, „Zichow“, „Postluch“ und „Karlswerk“ sind in den Abbildungen 8-11 dargestellt.

Ein Vergleich der Höhe der N_2O -Emissionen an den 4 Untersuchungsstandorten bzw. den verschiedenen beprobten Untersuchungsklassen zeigt, dass die Böden der dem Leitbild eines standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwaldes entsprechenden Untersuchungsstandorte „Weberslinden“ und „Zichow“ insgesamt deutlich geringere N_2O -Quellen darstellen als die Böden der Niederungswälder an den Untersuchungsstandorten „Postluch“ und „Karlswerk“. Da das Global Warming Potential (GWP) von Lachgas (N_2O ; Distickstoffoxid) 296-fach höher ist als das von CO_2 , deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass unter Gesichtspunkten des Klimaschutzes die Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder durchaus positiv zu bewerten ist. Die im Vergleich zu den standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwaldstandorten deutlich höheren N_2O -Emissionen aus den Böden der Niederungswälder dürften im wesentlichen in den dort überwiegend vorherrschenden anaeroben Bodenbedingungen begründet sein, die die Denitrifikation –als starke mikrobielle Quelle für N_2O – begünstigen (Abb. 8-11).

Der Vergleich der CH_4 -Flussraten an den 4 Untersuchungsstandorten zeigt, dass während der Freilandmesskampagnen die standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwälder im Mittel deutlich höhere CH_4 -Aufnahmeraten aus der Atmosphäre aufwiesen als die Niederungswaldstandorte. Die Böden der Untersuchungsklassen in „Zichow“ und „Weberslinden“ fungierten somit überwiegend als Senken für das stark klimawirksame Treibhausgas CH_4 , indem sie dieses potente Treibhausgas, das 21-fach klimawirksamer ist als CO_2 , über den mikrobiell katalysierten Prozess der Methanoxidation aus der Atmosphäre entfernten. Die Böden der Niederungswaldstandorte hingegen fungierten zumindest zu den

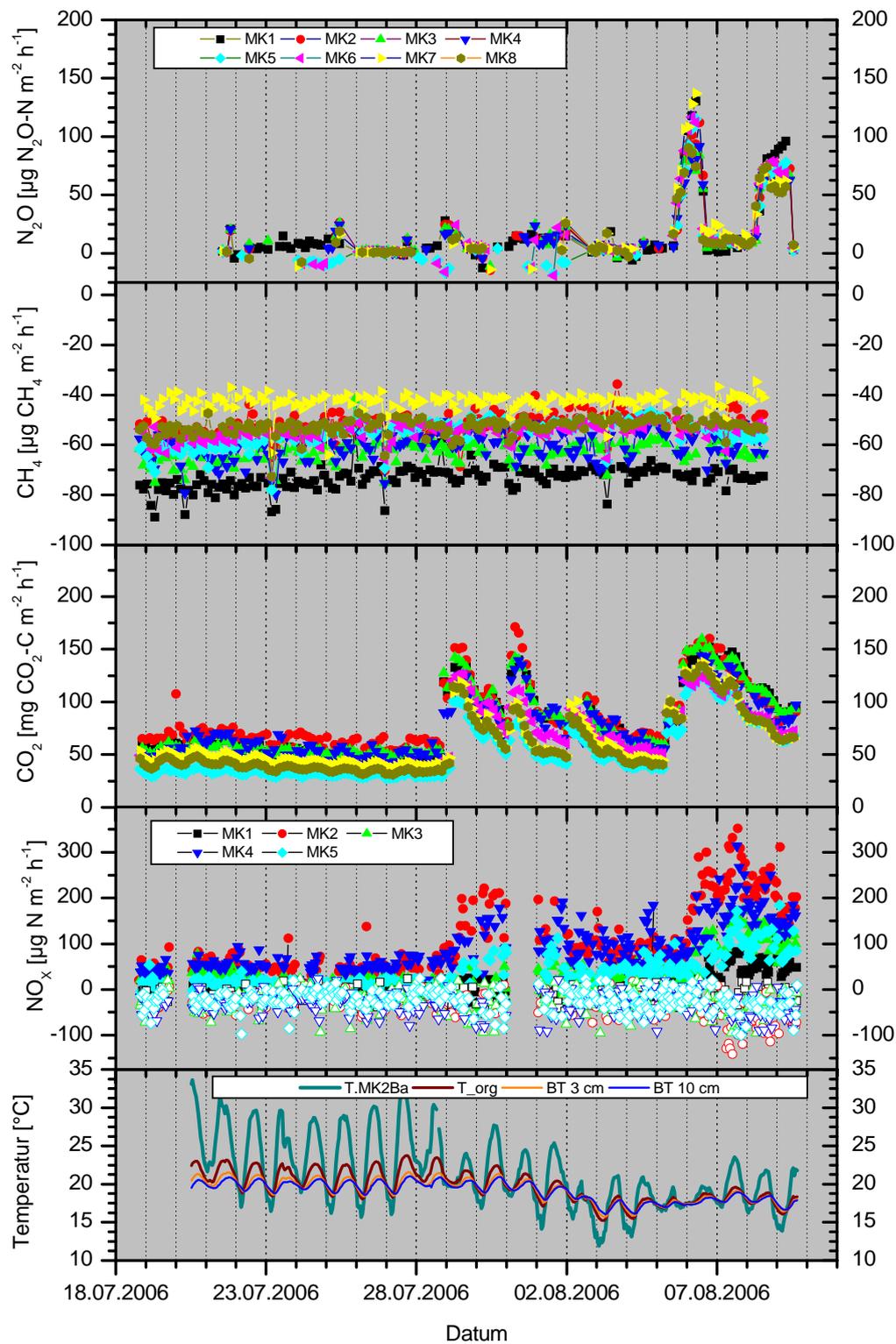


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der N_2O -, CH_4 -, CO_2 -, NO - und NO_2 -Flussraten sowie der Luft- und Boden-Temperaturen (organische Auflage; 3 cm Bodentiefe; 10 cm Bodentiefe) auf der Untersuchungsfläche **Weberslinden**. N_2O , CH_4 , CO_2 : MK1, MK2, MK3: Linden-Reinbestand; MK4: Buchen-Reinbestand; MK5, MK6, MK7, MK8: Linden-Buchen-Mischbestand. NO , NO_2 : MK1: Linden-Reinbestand; MK2: Buchen-Reinbestand; MK3, MK4, MK5: Linden-Buchen-Mischbestand. MK: Messkammer, BT: Bodentemperatur.

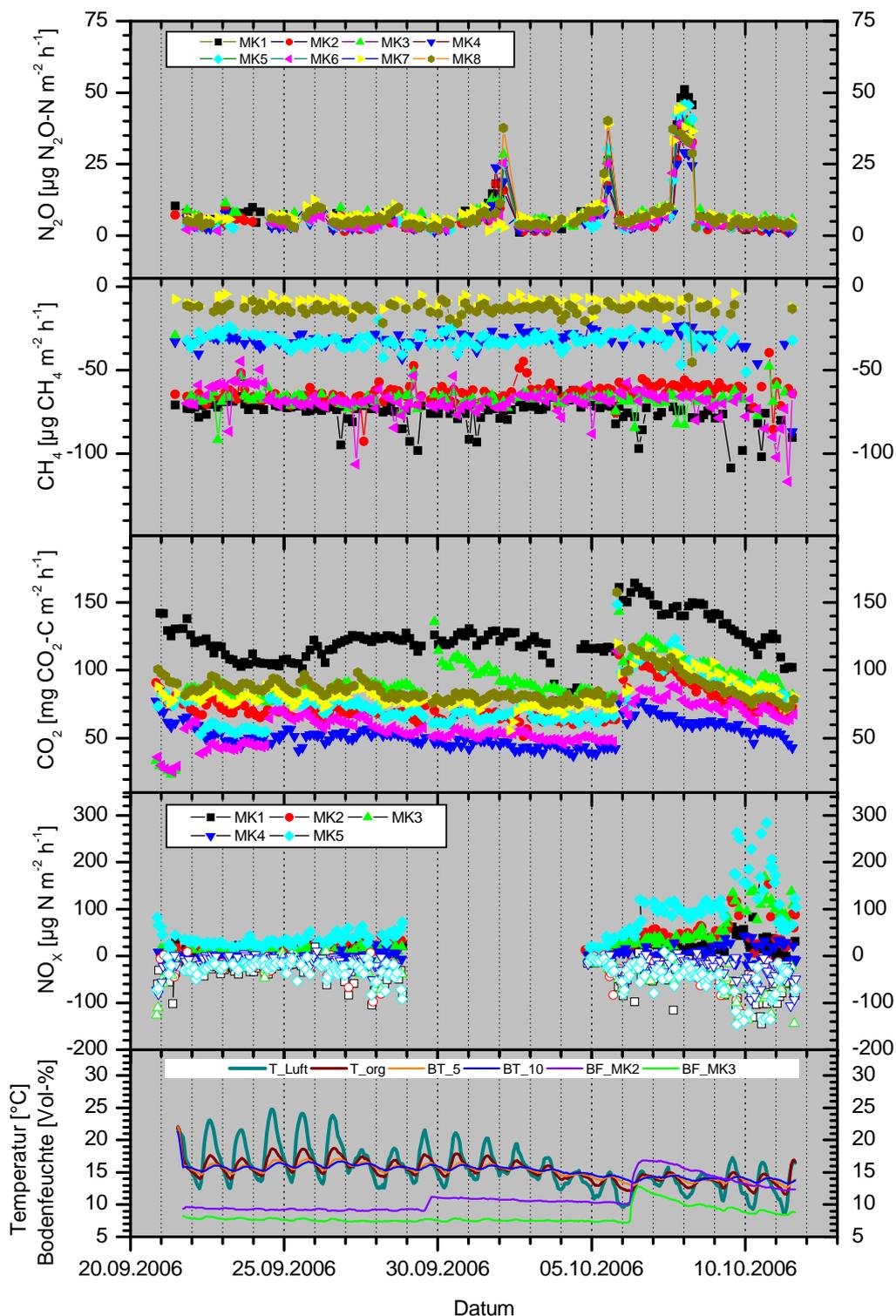


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der N_2O -, CH_4 -, CO_2 -, NO - und NO_2 -Flussraten sowie der Luft- und Bodentemperaturen (organische Auflage, 5 cm Bodentiefe, 10 cm Bodentiefe) und Bodenfeuchte (MK2, MK3) auf der Untersuchungsfläche **Zichow**. N_2O , CH_4 , CO_2 : MK1, MK2, MK3: Hainbuchen-Reinbestand; MK4: Eschen-Feldahorn-Mischbestand; MK5, MK6, MK7: Hainbuchen-Rotbuchen-Mischbestand; MK8: Hainbuchen-Rotbuchen-Traubeneichen-Mischbestand. NO ; NO_2 : MK1, MK2: Hainbuchen-Reinbestand; MK3: Eschen-Feldahorn-Mischbestand; MK4: Hainbuchen-Rotbuchen-Reinbestand; MK5: Hainbuchen-Rotbuchen-Traubeneichen-Mischbestand. MK: Messkammer, BT: Bodentemperatur.

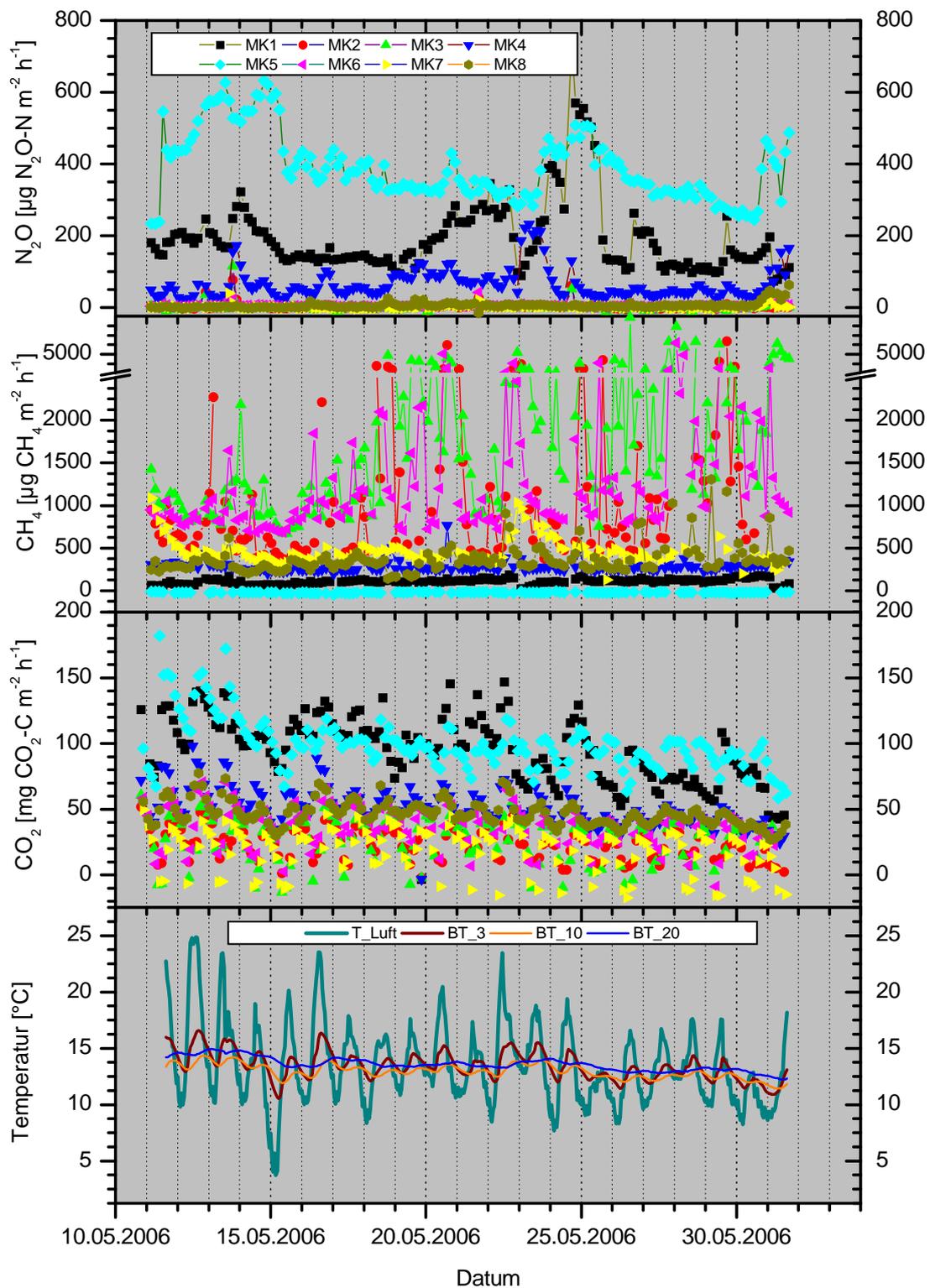


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der N₂O-, CH₄- und CO₂-Flussraten sowie der Luft- und Bodentemperaturen (3 cm Bodentiefe, 10 cm Bodentiefe, 20 cm Bodentiefe) auf der Untersuchungsfläche **Postluch**. MK1, MK2: „trockener Standort“; MK3, MK4: „mäßig nasse“ Standorte; MK5, MK6: „nasse“ Standorte; MK7, MK8: „mäßig trockene“ Standorte. MK: Messkammer, BT: Bodentemperatur.

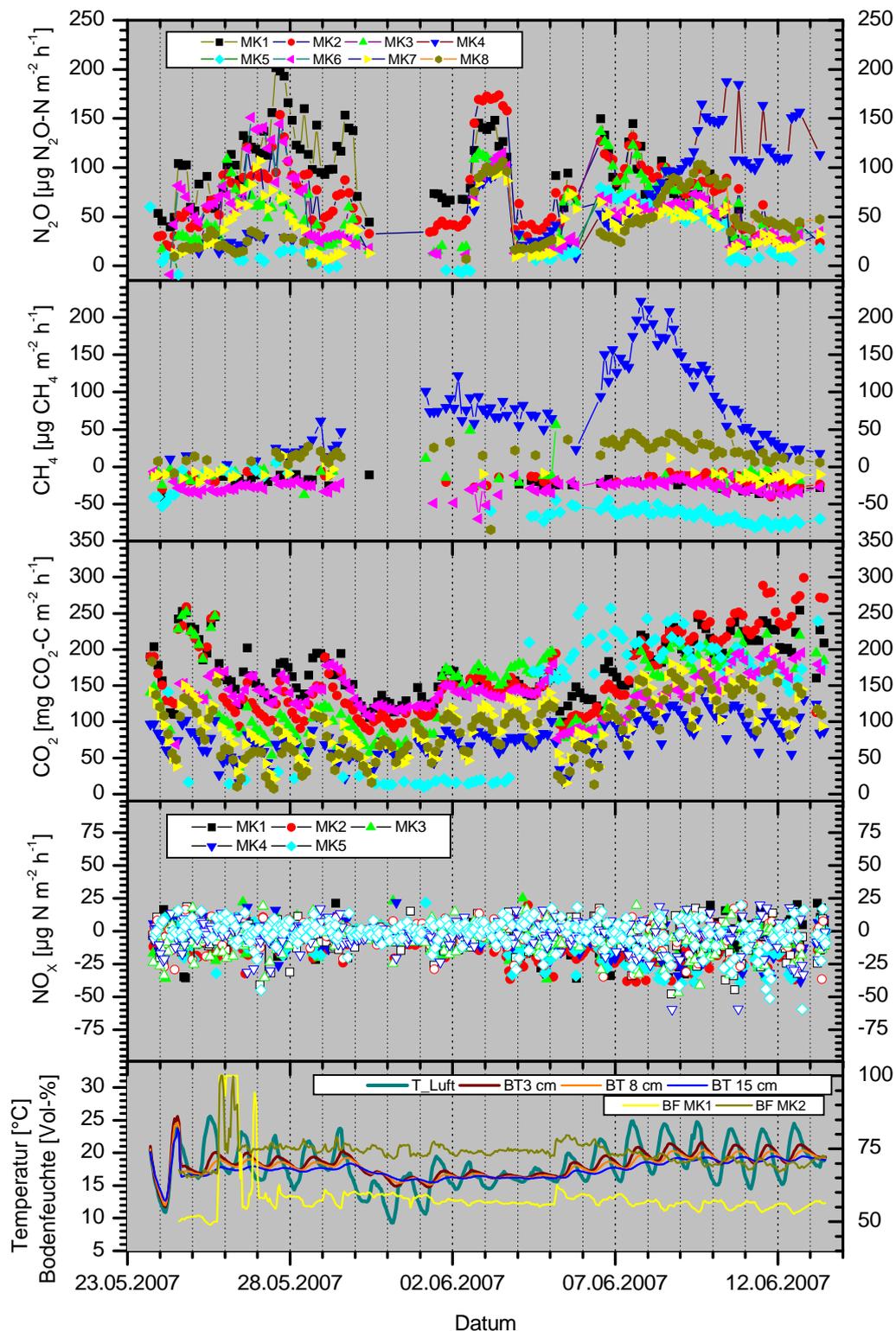


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der N_2O -, CH_4 -, CO_2 -, NO - und NO_2 -Flussraten sowie der Luft- und Bodentemperaturen (3 cm Bodentiefe, 8 cm Bodentiefe, 15 cm Bodentiefe) und Bodenfeuchte (MK2, MK3) auf der Untersuchungsfläche **Karlsruwerk**. N_2O , CH_4 , CO_2 : MK1, MK2: Eschen-Pappel-Mischbestand; MK3, MK4: Eschen-Reinbestand; MK5, MK6: Eschen-Erlen-Mischbestand; MK7: Erlen-Eschen-Ahorn-Mischbestand; MK8: Ahorn-Eschen-Mischbestand. NO ; NO_2 : MK1, MK2: Eschen-Reinbestand; MK3: Eschen-Erlen-Mischbestand; MK4: Erlen-Eschen-Ahorn-Mischbestand; MK5: Ahorn-Eschen-Mischbestand. MK: Messkammer, BT: Bodentemperatur.

Zeitpunkten der Überflutung -und hierdurch induzierten anaeroben Bedingungen, die den mikrobiellen Prozess der Methanogenese fördern, den der aeroben Methanoxidation hingegen reduzieren- überwiegend als Quellen für CH₄, setzten also dieses potente Treibhausgas in die Atmosphäre frei. Auch diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes (Schutzes der Ressource Atmosphäre) die Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder eher günstig zu bewerten ist (Abb. 8-11).

Der Vergleich der bodenbürtigen CO₂-Emissionen an den Untersuchungsstandorten zeigt, dass der Niederungswaldstandort „Karlswerk“, der sich durch mineralische Böden auszeichnet, die höchsten CO₂-Freisetzungsraten aus dem Boden aufwies, auch gegenüber dem anderen Niederungswaldstandort „Postluch (organische Böden), zumindest zu Zeiten der Überstauung der Böden in „Postluch“. Somit zeigen die standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwälder geringere bodenbürtige CO₂-Emissionen als die Niederungswälder, mit Ausnahme des Standorts Postluch zu Zeiten der Überstauung (Abb. 8-11).

Während die Untersuchungsstandorte „Zichow“ und „Weberslinden“ im Mittel als schwache Quellen für NO_x fungierten, fungierte der Standort „Karlswerk“ als einziger Standort im Mittel als Netto-Senke für NO_x (Abb. 8-11).

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur in-situ Parametrisierung der Abhängigkeit der Treibhausgasflussraten von der in-situ Bodentemperatur und -Feuchte ergaben für den beispielhaft ausgewählten Standort „Zichow“, dass der Effekt der Temperatur auf die Höhe der Treibhausemissionen gegenüber dem Einfluss der Bodenfeuchte nahezu vernachlässigbar ist, zumindest unter den in den Freilandmesszeiträumen in situ vorherrschenden Bodentemperaturen und Bodenfeuchten (Abb. 12).

Die Ergebnisse aus diesen umfangreichen Parametrisierungsuntersuchungen flossen in die Ableitung multipler polynomischer Regressionsmodelle für die Adaptation des prozessorientierten Modells FOREST-DNDC ein. Diese Regressionsmodelle sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

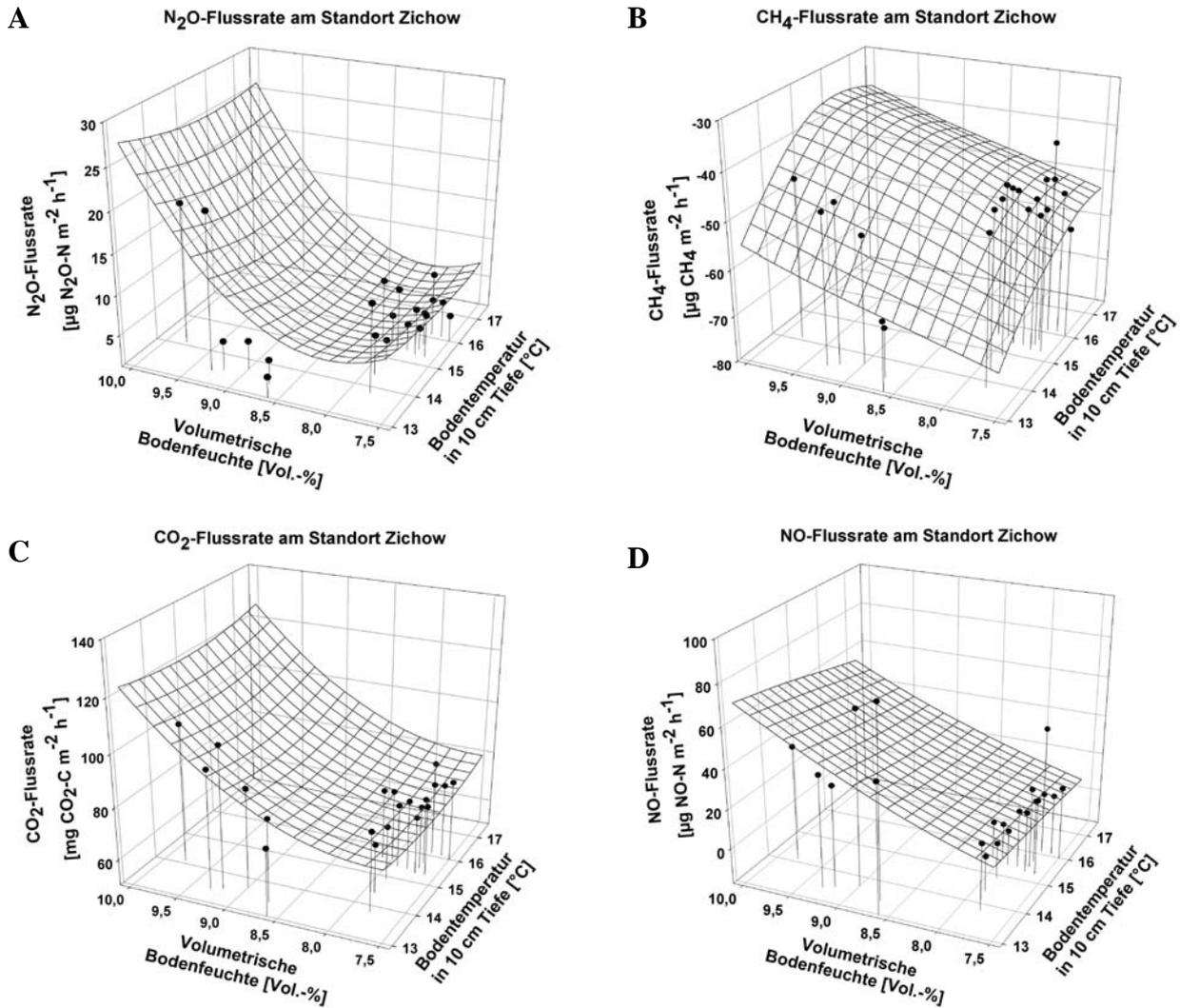


Abbildung 12: Ergebnisse zur in-situ-Parametrisierung der Abhängigkeit der N₂O-, CH₄-, CO₂-, und NO-Flussraten von in-situ Bodentemperatur und Bodenfeuchte für die Adaptation des prozessorientierten Modells FOREST-DNDC am Beispiel des Untersuchungsstandorts „Zichow“ (aus Gützloe, 2009).

Tabelle 4: Multiple polynomische Formel zur Berechnung der N₂O-, CH₄-, CO₂- und NO-Flussraten in Abhängigkeit von der Bodentemperatur (Bt) [°C] und der Bodenfeuchte (Bf) [Vol.-%] am Untersuchungsstandort „Zichow“ zur Adaptation des prozessorientierten Modells FOREST-DNDC (aus Gützloe, 2009).

Gas-Flussrate = a + b · Bt ₁₀ + c · Bf _v + d · Bt ₁₀ ² + e · Bf _v ²						
	a	b	c	d	e	r ²
N ₂ O	560,24	-8,32	-117,65	0,26	7,05	0,523
CH ₄	-797,38	87,57	7,15	-2,75	-0,04	0,431
CO ₂	901,26	-25,91	-159,31	0,86	10,03	0,832
ln NO	-0,27	-0,08	0,56	-	-	0,591

7.3 Prozessorientierte Modellierung zur Bestimmung von Gesamt-Treibhausgasbilanzen und Nitrat-Austrägen: Bewertung der Umsetzung des Leitbildes eines klimaplastischen Laubmischwaldes unter den Gesichtspunkten Klimaschutz und N-Nährstoffretention bei prognostizierten zukünftigen Klimaänderungen (IPCC-Szenarien A1B sowie B1)

Das unter Verwendung der aus den umfangreichen Parametrisierungsuntersuchungen und den Freilandmessungen weiterentwickelte Modell FOREST-DNDC wurde auf seine Fähigkeit getestet, die in situ gemessenen bodenbürtigen N₂O, NO-, CH₄- und CO₂-Emissionen erfolgreich zu simulieren. Hierzu wurden für den Beobachtungszeitraum 2004-2006 die Jahresklimadaten (DWD) als Modelltreiber eingesetzt und der saisonale Verlauf der Spurengasemissionen über einen Zeitraum von 3 Jahren simuliert. Abbildung 13 zeigt beispielhaft für den Untersuchungsstandort „Zichow“ die Ergebnisse der Modell-Simulationsläufe und den Vergleich mit den in 2006 in situ gemessenen Emissionsraten am Standort „Zichow“. Die Abbildung zeigt, dass das Modell den saisonalen Verlauf der in situ Spurengasemissionen recht gut wiedergibt. Die Gegenüberstellung von gemessenen in-situ N₂O- bzw. NO-Emissionen mit den vom Modell simulierten Emissionen (Abb. 14) zeigt eine recht gute Übereinstimmung zwischen simulierten und in situ gemessenen Werten für die Standorte „Zichow“ und „Weberslinden“ sowie für einen aus einem Vorläuferprojekt zu diesem Vorhaben im Rahmen eines BMBF-Projektes beprobten weiteren Standort „Wildbahn“ (Kiefernreinbestand) und auch für 21 bzw. 16 weitere Waldstandorte, die im Rahmen des EU-Projekts „NOFRETETE beprobt wurden. Das weiterentwickelte Modell FOREST-DNDC konnte somit als validiert gelten und für die Simulationen der bodenbürtigen CO₂-, CH₄-, N₂O- und NO-Emissionen sowie von Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen unter jetzigen und für die Zukunft prognostizierten Klimabedingungen eingesetzt werden.

Hierzu wurden 10-Jahressimulationen der bodenbürtigen CO₂-, N₂O-, NO- und CH₄-Emissionen durchgeführt. Ein Beispiel für eine solche 10-Jahressimulation unter dem Klimaszenario A1B für die Jahre 2048-2057 ist für einen standortoptimierten klimaplastischen Buchen-Laubmischwald-Typ in Abbildung 15 dargestellt. Solche 10-Jahressimulationen bildeten dann die Datengrundlage für die Berechnung von 10-Jahresmittelwerten der Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen, die in den folgenden Abbildungen 16-21 dargestellt sind.

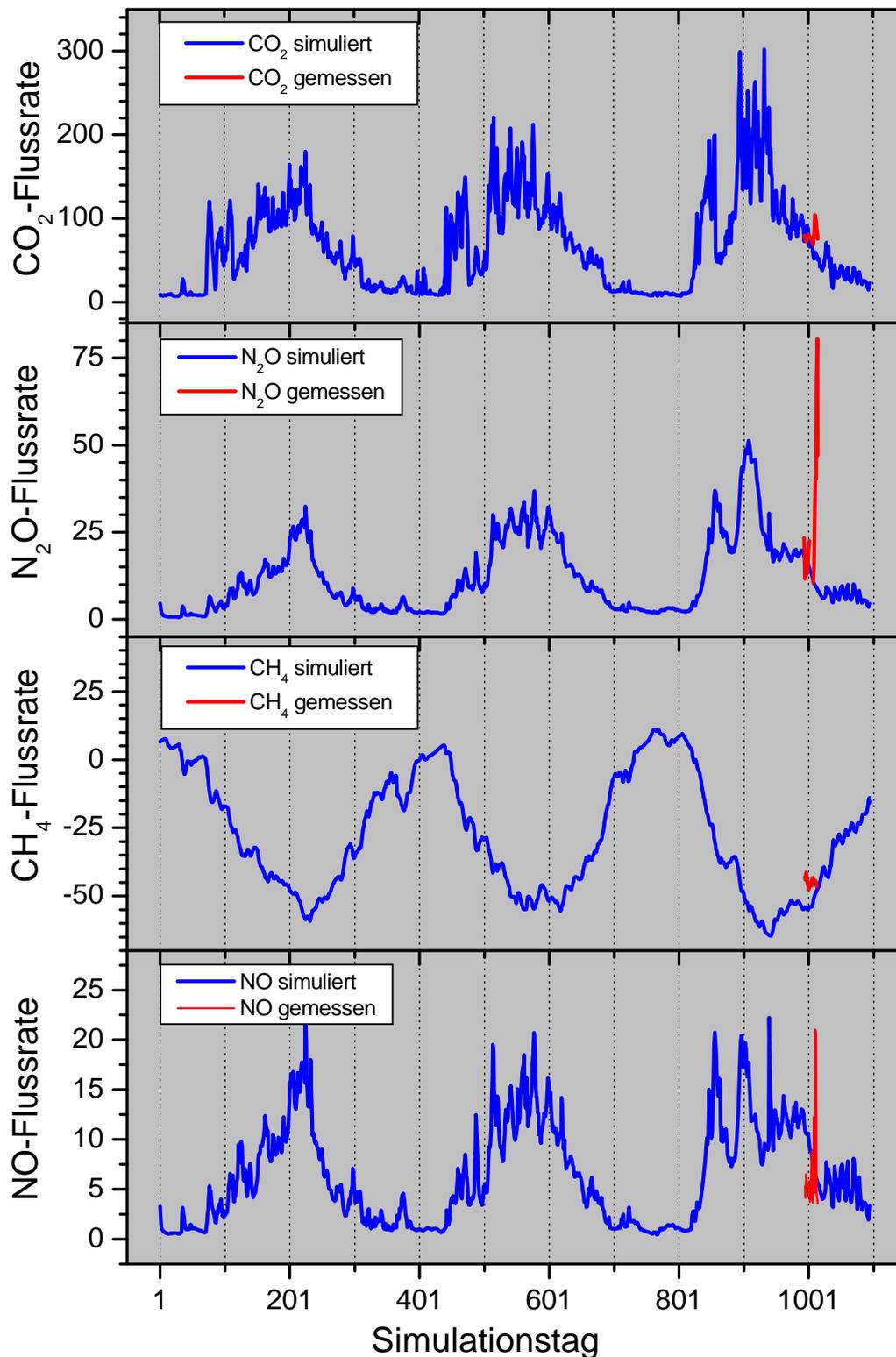


Abbildung 13: Simulationen der jahreszeitlichen Verläufe der CO₂-, N₂O-, CH₄- und NO-Flussraten über einen Zeitraum von 3 Jahren (2004-2006) sowie Vergleich mit den im Jahre 2006 gemessenen in-situ Spurengas-Flussraten zur Validierung des adaptierten prozeß-orientierten Modells FOREST-DNDC für den dem Leitbild eines klimaplastischen Laub-Mischwaldtyps entsprechenden Waldstandort „Zichow“ unter Verwendung aktueller Klimadaten (DWD).

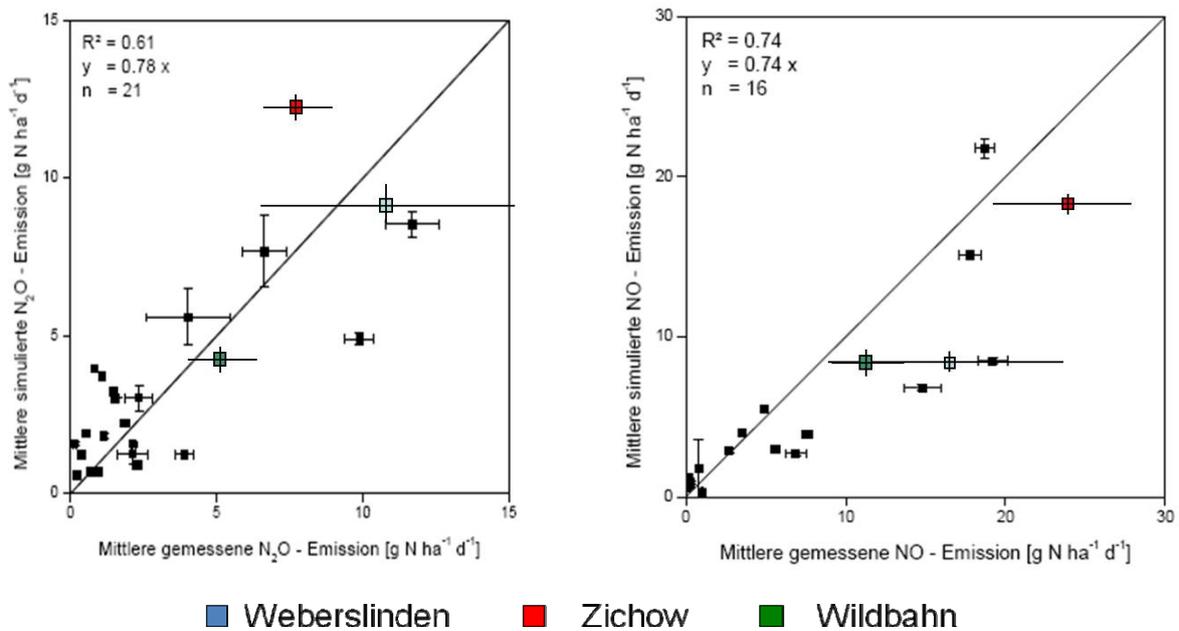


Abbildung 14: Ergebnisse der Validierung des adaptierten prozeß-orientierten Modells FOREST-DNDC. Gegenüberstellung von gemessenen in-situ N_2O - bzw. NO -Emissionen und vom Modell simulierten Emissionen für die im Rahmen des vorliegenden Teilprojekts untersuchten, dem Leitbild eines klimaplastisch optimierten Laub-Mischwaldtyps entsprechenden Waldstandorte „Weberslinden“ und „Zichow“, einen Kiefern-Reinbestand im Nordostdeutschen Tiefland („Wildbahn“) sowie weitere im Rahmen eines EU-Projekts (NOFRETETE) untersuchte europäische Waldstandorte (N=21 für N_2O , N=16 für NO ; ■).

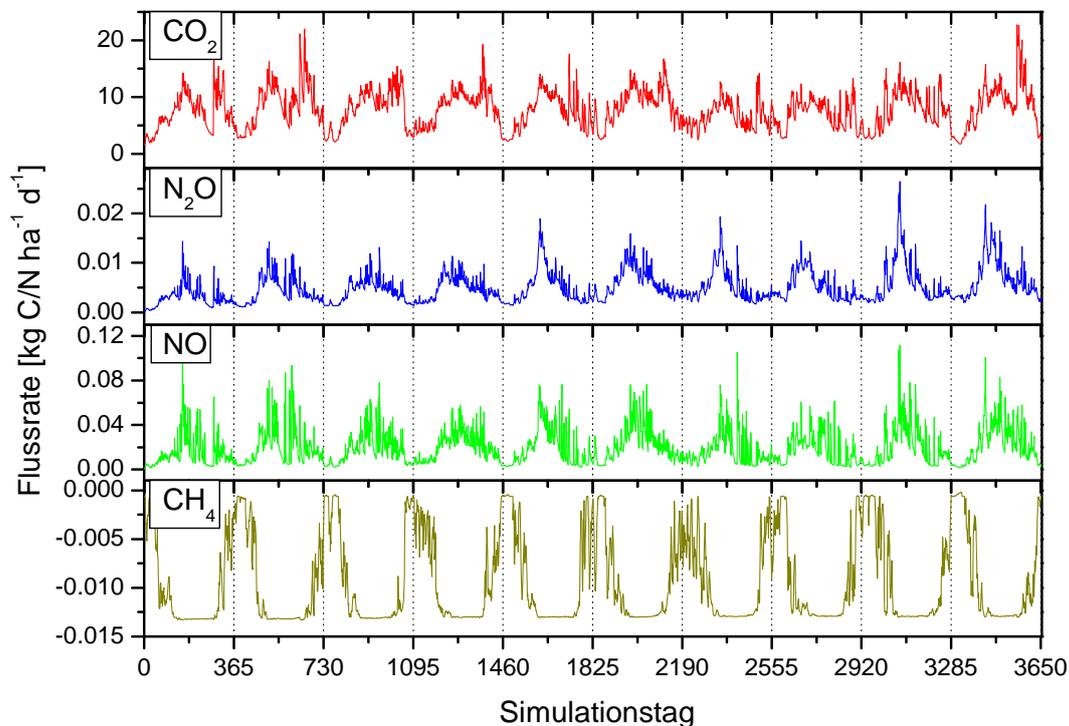


Abbildung 15: Beispiel für mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Jahresverläufe der CO_2 , N_2O , NO und CH_4 -Flußraten über einen Zeitraum von 10 Jahren (2048-2057) für das Klimaszenario A1B für die Simulationsjahre 2048-2057 für einen klimaplastisch optimierten Buchen-Laubmischwaldtyp. Solche 10-Jahres-Simulationen bildeten jeweils die Datengrundlage für die Berechnung von 10-Jahres-Mittelwerten der Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen, die in den folgenden Abbildungen in Form von Balkendiagrammen dargestellt sind.

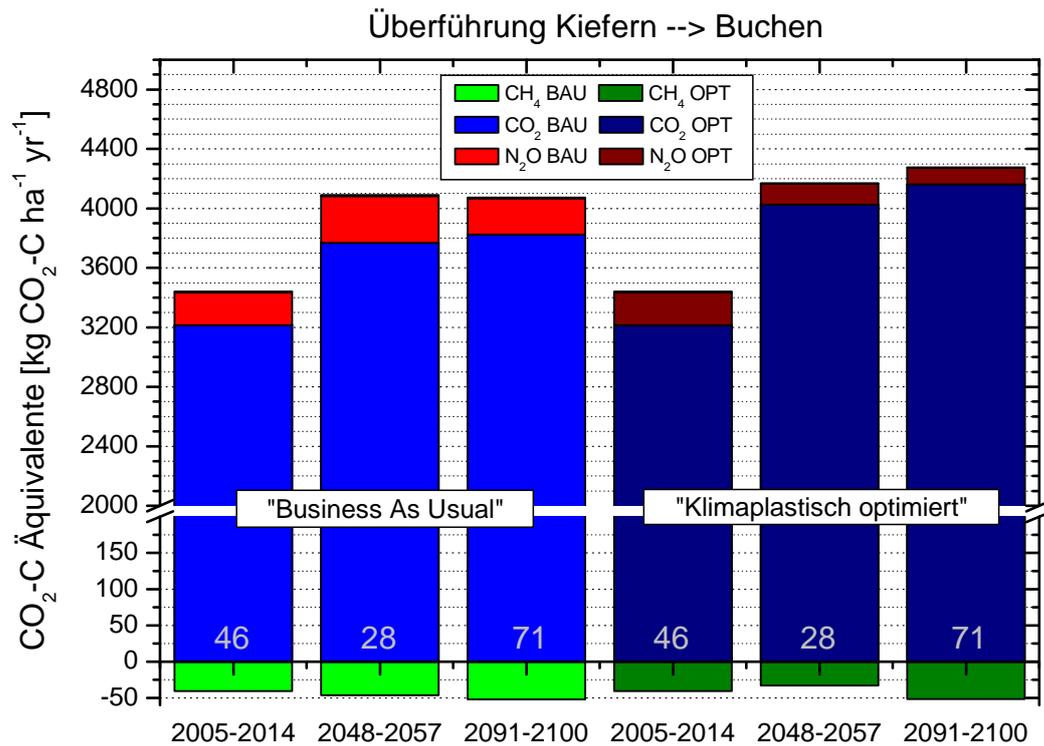


Abbildung 16: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für die Landnutzungsszenarien „Business As Usual“ (Kiefer bleibt Kiefer) sowie „klimaplastisch optimiert“ (Überführung Kiefer in Buchenmischwälder) unter Anwendung des Klimaszenarios A1B für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100. Zahlen in den Säulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn des Simulationszeitraums. BAU: „Business As Usual“; OPT: „klimaplastisch optimiert“.

Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Modellsimulationen in den Simulationszeiträumen 2005-2014, 2048-2057 und 2091-2100 unter dem Klimaszenario A1B zur Gesamt-Treibhausgas-Bilanz für Waldflächen, auf denen einerseits die bisherige Waldbewirtschaftung fortgeführt wurde („Business As Usual“: Kiefer bleibt Kiefer) mit der gleichen Waldfläche, auf der das Leitbild der Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder umgesetzt wurde (Kiefer wird Buchenmischwald). Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden alle Treibhausgas-Flussraten in CO₂-C-Äquivalenten ausgedrückt, wobei zur Umrechnung der N₂O- und CH₄-Emissionen in CO₂-C-Äquivalenten ein Treibhausgaspotential von 296 * CO₂ (für N₂O) bzw. 21 * CO₂ (für CH₄) verwendet wurde.

Die Simulationen der bodenbürtigen Emissionen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Klimaplastisch optimiert in „2050“, in denen die Baumbestände auf der Fläche zu Beginn der Simulation im Jahre 2048 ein Alter von 28 Jahren nach erfolgtem Umbau aufweisen:
 - Zunahme der CO₂-Emissionen um 257 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ gegenüber „Business-As-Usual“
 - Rückgang der N₂O-Emissionen um 174 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Rückgang der CH₄-Aufnahme um 16 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Gesamt-Bilanz: Insgesamt eine Zunahme der bodenbürtigen Treibhausgas-Emissionen um 99 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

In den ersten Jahrzehnten der Umbauphase von derzeitigen Kiefer-Reinbeständen in zukünftige Buchen-Mischwälder ist – bedingt durch die durch den Umbau ausgelösten Störung der sich im Gleichgewicht befindlichen Stoffkreisläufe im Gesamtsystem – trotz des prognostizierten Rückgangs in der Höhe der Emissionen des sehr potenten Treibhausgases N₂O - insgesamt mit einer Zunahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen zu rechnen.

2. Klimaplastisch optimiert in „2100“, in denen die Baumbestände auf der Fläche zu Beginn der Simulation im Jahre 2091 ein Alter von 71 Jahren nach erfolgtem Umbau aufweisen:
 - Zunahme der CO₂-Emissionen um 338 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ gegenüber „Business-As-Usual“
 - Rückgang der N₂O-Emissionen um 134 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Zunahme der CH₄-Aufnahme um 1 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Gesamt-Bilanz: Insgesamt eine Zunahme der bodenbürtigen Treibhausgas-Emissionen um 203 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

Auch in adulten Beständen ist nach Umbau von Kiefer-Reinbeständen in Buchen-Laubmischbeständen mit erhöhten bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen zu rechnen. Die Zunahme in den bodenbürtigen CO₂-Emissionen kann nicht durch den Rückgang in den N₂O sowie den CH₄-Flussraten kompensiert werden. Die Zunahme der CO₂-Emissionen dürfte überwiegend auf veränderte Streu-Qualität (Laubblatt vs. Nadelblatt-Streu) zurückzuführen sein, da Laubblattstreu wesentlich schneller als Nadelblatt-Streu umgesetzt wird, was höhere Mineralisationsraten, erhöhte Bodenrespirationsraten und somit erhöhte bodenbürtige CO₂-Emissionen bedeutet.

Zur ökologischen Gesamt-Bewertung des Umbaus von Kiefern-Reinbeständen in standortoptimierte klimaplastische Laubmischwälder muss neben der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Bilanz die ökosystemare Gesamt-Treibhausgas-Bilanz betrachtet werden. Hierzu muss die Netto-Primärproduktion (NPP) der Bestände, die den Ergebnissen aus TP A-c (Dr. H. Jochheim, ZALF, Müncheberg) zufolge in den standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwäldern zwischen 800 und 1000 kg C ha⁻¹ yr⁻¹ höher liegt als in den Kiefern-Reinbeständen, in die Berechnung einbezogen werden. Unter Berücksichtigung der NPP darf gefolgert werden, dass die ökosystemare Gesamt-Treibhausgas-Bilanz der zu etablierenden standortoptimierten klimaplastischen Laubmischwälder unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes (Schutzes der Ressource Atmosphäre) deutlich günstiger ist als die von Kiefern-Reinbeständen.

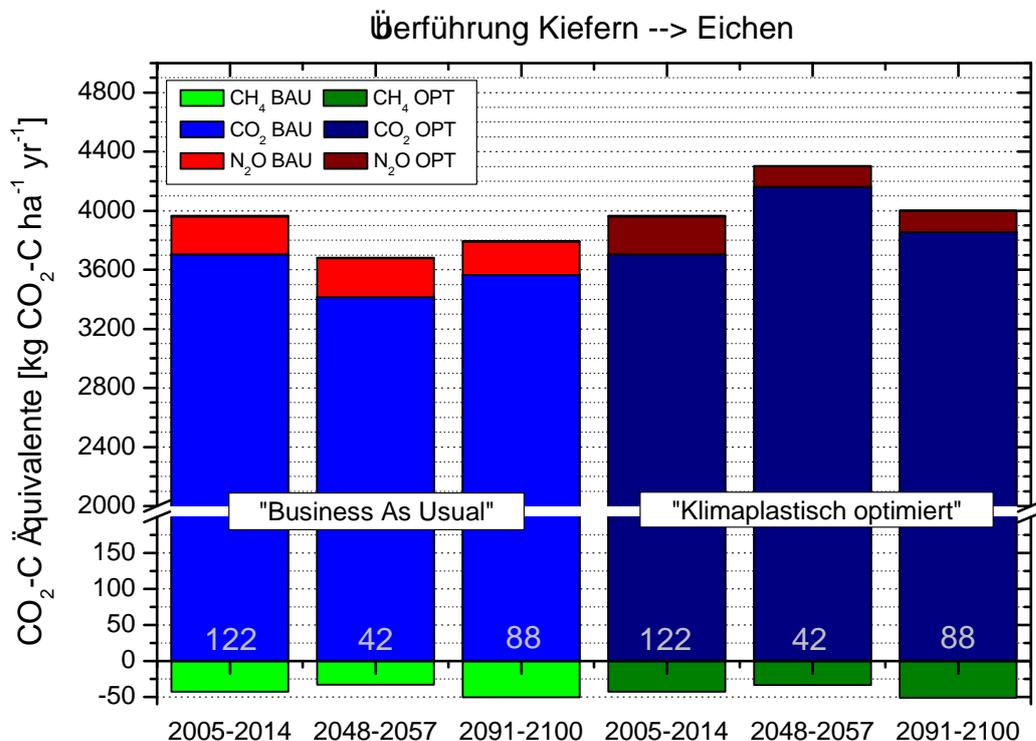


Abbildung 17: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für die Landnutzungsszenarien „Business As Usual“ (Kiefer bleibt Kiefer) sowie „klimaplastisch optimiert“ (Überführung Kiefer in Eichenmischwälder) unter Anwendung des Klimaszenarios A1B für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100. Zahlen in den Säulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn des Simulationszeitraums. BAU: „Business As Usual“; OPT: „klimaplastisch optimiert“.

Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Modellsimulationen in den Simulationszeiträumen 2005-2014, 2048-2057 und 2091-2100 unter dem Klimaszenario A1B zur Gesamt-Treibhausgas-Bilanz für Waldflächen, auf denen einerseits die bisherige Waldbewirtschaftung fortgeführt wurde („Business As Usual“: Kiefer bleibt Kiefer) mit der gleichen Waldfläche, auf der das Leitbild der Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder umgesetzt wurde (Kiefer wird Eichenmischwald). Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden auch hier alle Flussraten in CO₂-C-Äquivalenten ausgedrückt.

Diese Simulationsrechnungen zu den bodenbürtigen Treibhausgas-Emissionen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Klimaplastisch optimiert in „2050“, in denen die Baumbestände auf der Fläche zu Beginn der Simulation im Jahre 2048 ein Alter von 42 Jahren nach erfolgtem Umbau aufweisen:
 - Zunahme der CO₂-Emissionen um 747 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ gegenüber „Business-As-Usual“
 - Rückgang der N₂O-Emissionen um 125 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Zunahme der CH₄-Aufnahme um 1 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Gesamt-Bilanz: Insgesamt eine Zunahme der bodenbürtigen Treibhausgas-Emissionen um 621 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

Der Rückgang der N₂O-Emissionen in Höhe von 125 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ deutet darauf hin, dass auf nährkräftigen Standorten, der im Boden verfügbare Stickstoff nicht vollständig durch die Kiefer aufgenommen wird. Somit kann „überschüssiger“ Stickstoff potentiell in Form von N₂O in die Atmosphäre freigesetzt werden. Durch den Umbau in Eichen-Laubmischwälder wird mehr Stickstoff in der oberirdischen Biomasse fixiert und somit der im Boden verfügbare Stickstoff effizienter zum Baumwachstum genutzt.

2. Klimaplastisch optimiert in „2100“, in denen die Baumbestände auf der Fläche zu Beginn der Simulation im Jahre 2091 ein Alter von 88 Jahren nach erfolgten Umbau aufweisen:
 - Zunahme der CO₂-Emissionen um 289 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ gegenüber „Business-As-Usual“
 - Rückgang der N₂O-Emissionen um 80 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
 - Zunahme der CH₄-Aufnahme um 1 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

- Gesamt-Bilanz: Insgesamt eine Zunahme der bodenbürtigen Treibhausgas-Emissionen um $208 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

Auch in den reifen Beständen ist nach Umbau von Kiefer-Reinbeständen in Eichen-Laubmischwaldbestände insgesamt betrachtet mit erhöhten bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen zu rechnen. Die Zunahme in den bodenbürtigen CO_2 -Emissionen kann auch bei diesem Umbau-Szenario nicht durch den Rückgang in den N_2O sowie den CH_4 -Flussraten kompensiert werden. Auch hier darf angenommen werden: die Zunahme der CO_2 -Emissionen dürfte überwiegend auf die veränderte Streu-Qualität (Laubblatt vs. Nadelblatt-Streu) zurückzuführen sein (s.o.)

Auch hier muss festgehalten werden, dass unter Berücksichtigung der NPP der Bestände (s.o.) die ökosystemare Gesamt-Treibhausgas-Bilanz für die Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder immer noch deutlicher günstiger ausfällt als für Kiefern-Reinbestände.

Abbildung 18 zeigt eine Gegenüberstellung der Auswirkung unterschiedlicher Klimaszenarien (A1B vs. B1) auf die bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen nach Umsetzung des Leitbilds zur Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Buchenlaubmischwälder.

Für den Simulationszeitraum 2005-2014 zeigen sich folgende Ergebnisse aus dem Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B:

- Zunahme der bodenbürtigen CO_2 -Emissionen in Höhe von $46 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
- Zunahme der N_2O -Emissionen in Höhe von $12 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
- Zunahme der CH_4 -Aufnahme in Höhe von $1.8 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
- Gesamt-Bilanz: Zunahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen gegenüber A1B in Höhe von $56.2 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

Für den Simulationszeitraum 2048-2057 zeichneten sich folgende Ergebnisse aus dem Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B ab:

- Abnahme der bodenbürtigen CO_2 -Emissionen in Höhe von $155 \text{ kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

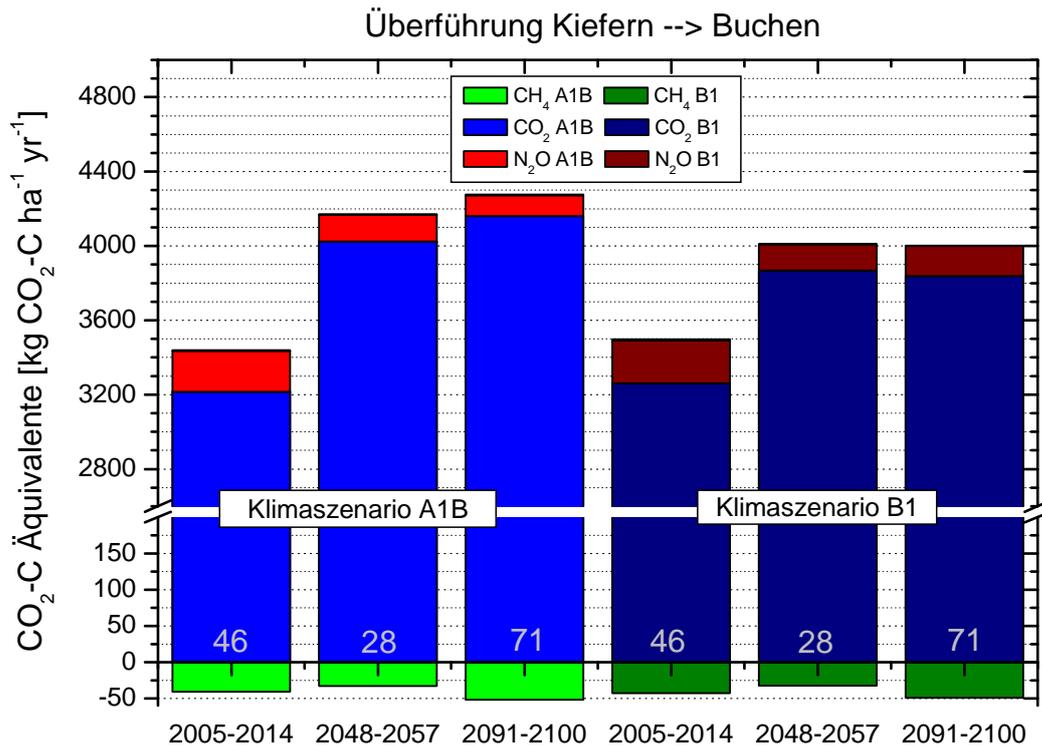


Abbildung 18: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für die Klimaszenarien A1B sowie B1 bei Überführung von Kiefernreinbeständen in klimaplastische Buchenmischwälder für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100. Zahlen in den Säulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn des Simulationszeitraums.

- Zunahme der N₂O-Emissionen in Höhe von 4 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Abnahme der CH₄-Aufnahme in Höhe von 0.5 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Gesamt-Bilanz: Abnahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen gegenüber A1B in Höhe von 150.5 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

In diesem Simulationszeitraum wirken sich die in B1 gegenüber A1B prognostizierte geringere Jahresmitteltemperatur und die niedrigere mittlere jährliche Niederschlagsmenge aus und führen ibs. zu der prognostizierten Abnahme der stärker temperaturgesteuerten Bodenrespiration (CO₂-Freisetzung), aber nur zu einer geringen Zunahme der N₂O-Emissionen, die stärker Feuchte- denn Temperatur-gesteuert sind.

Für den Simulationszeitraum 2091-2100 wurden für den Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B folgende Simulationsergebnisse erzielt:

- Abnahme der bodenbürtigen CO₂-Emissionen in Höhe von 323 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

- Zunahme der N₂O-Emissionen in Höhe von 50 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Abnahme der CH₄-Aufnahme in Höhe von 2.2 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Gesamt-Bilanz: Abnahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 270.8 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

In dieser Simulations-Zeitscheibe führten ca. 100 mm höhere Niederschläge im Klimaszenario B1 gegenüber Klimaszenario A1B zu einer deutlichen Zunahme der bodenbürtigen N₂O-Emissionen sowie aufgrund der niedrigeren Temperaturen zu einer deutlichen Abnahme der bodenbürtigen CO₂-Emissionen.

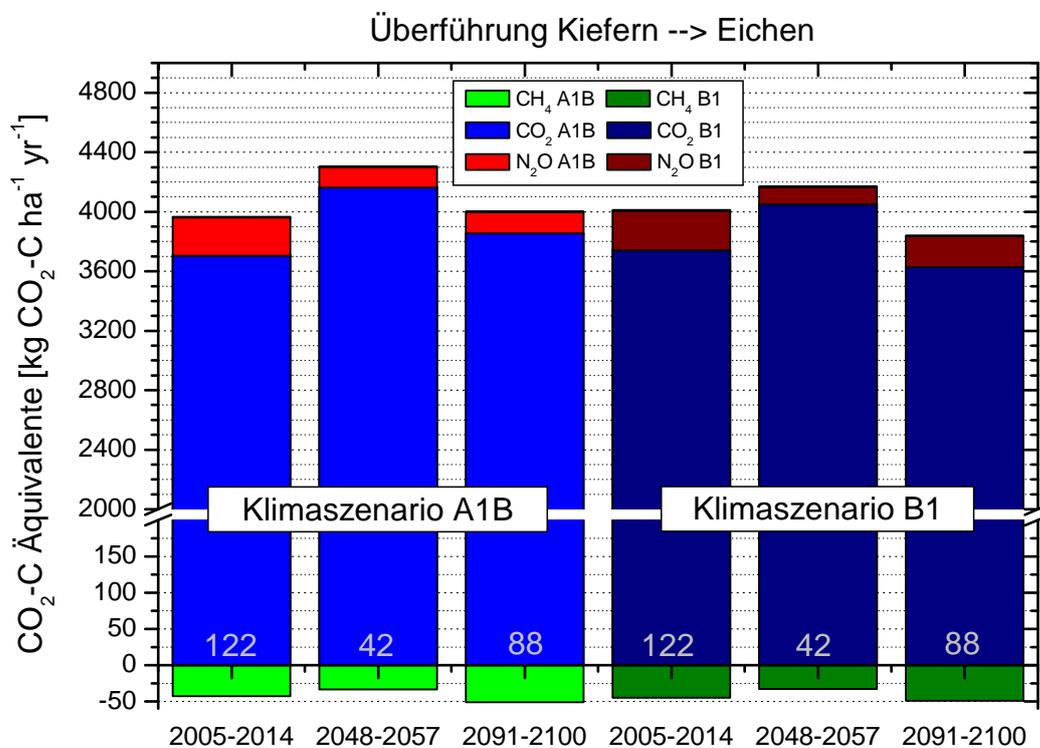


Abbildung 19: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für die Klimaszenarien A1B sowie B1 bei Überführung von Kiefernreinbeständen in klimaplastisch optimierte Eichenmischwälder für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100. Zahlen in den Säulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn des Simulationszeitraums.

Abbildung 19 zeigt eine Gegenüberstellung der Auswirkung unterschiedlicher Klimaszenarien (A1B vs. B1) auf die bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen nach

Umsetzung des Leitbilds zur Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Eichenlaubmischwälder.

Für den Simulationszeitraum 2005-2014 zeigen sich folgende Ergebnisse aus dem Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B:

- Zunahme der bodenbürtigen CO₂-Emissionen in Höhe von 36 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Zunahme der N₂O-Emissionen in Höhe von 8.7 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Zunahme der CH₄-Aufnahme in Höhe von 2.0 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Gesamt-Bilanz: Zunahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 42.7 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

Für den Simulationszeitraum 2048-2057 zeigen sich folgende Ergebnisse aus dem Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B:

- Abnahme der bodenbürtigen CO₂-Emissionen in Höhe von 113 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Abnahme der N₂O-Emissionen in Höhe von 21.3 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Abnahme der CH₄-Aufnahme in Höhe von 0.4 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Gesamt-Bilanz: Abnahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 133.9 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

Für den Simulationszeitraum 2091-2100 ergaben sich folgende Resultate aus dem Vergleich Klimaszenario B1 vs. A1B:

- Abnahme der bodenbürtigen CO₂-Emissionen in Höhe von 225 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Zunahme der N₂O-Emissionen in Höhe von 62.3 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Abnahme der CH₄-Aufnahme in Höhe von 2.1 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹
- Gesamt-Bilanz: Abnahme der bodenbürtigen Gesamt-Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 160.6 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹

In diesem Simulationszeitraum führen –wie bereits für den standortoptimierten klimaplastischen Buchenmischwald ausgeführt (s.o.) - auch hier die im Klimaszenario B1 prognostizierten höheren Niederschläge zu einer deutlichen Zunahme in der Höhe der N₂O-Emissionen, jedoch aufgrund der prognostizierten geringeren mittleren Jahrestemperatur zu deutlich niedrigeren bodenbürtigen CO₂-Emissionen.

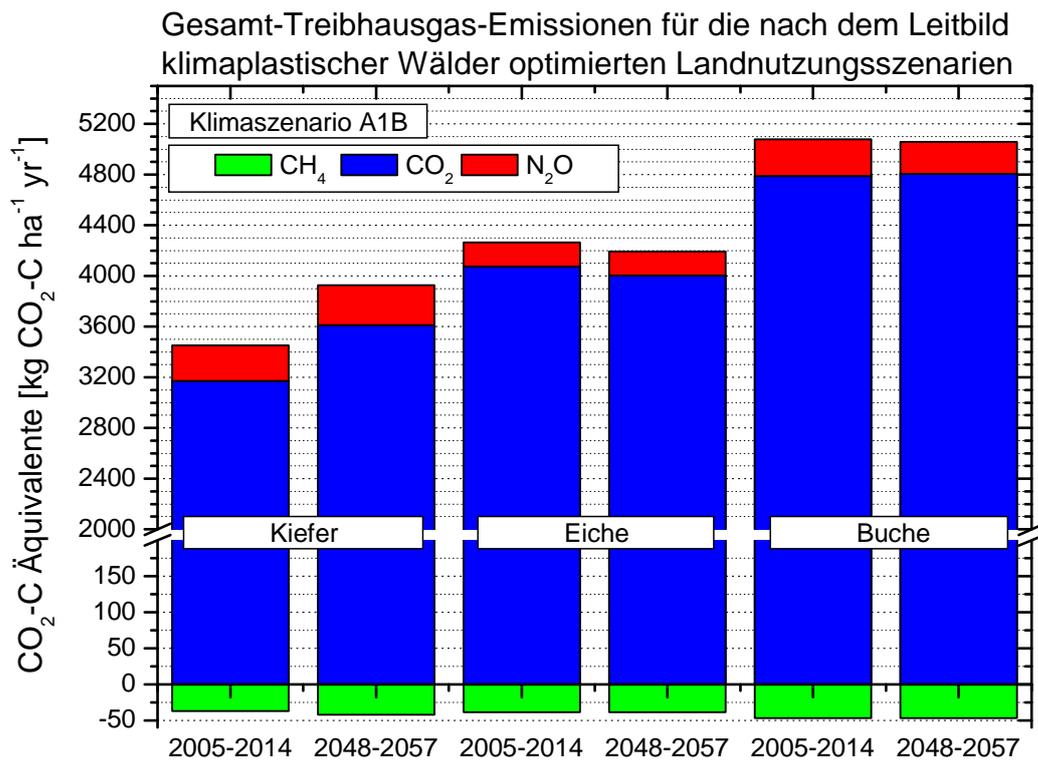


Abbildung 20: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für das Klimaszenario A1B, wenn kein/e Überführung/Umbau der Bestände erfolgt, jeweils für die Simulationsjahre 2005-2014 und 2048-2057.

Insgesamt zeigen diese Simulationsergebnisse, dass sich ein zukünftiges Klima, das dem Klimaszenario B1 entspräche, in Bezug auf die Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen günstiger auswirkt als ein zukünftiges Klima in der Modellregion, das dem Szenario A1B entspräche.

Abbildung 20 und 21 zeigen die Simulationsergebnisse mit dem adaptierten Modell FOREST-DNDC zu den Auswirkungen der Klimaänderung unter den IPCC-Klimaszenarien A1B und B1 auf die Baumarten Kiefer, Buche und Eiche für die Zeitscheiben 2005-2014 sowie 2048-2057.

Die Modellsimulationen zeigen, dass für beide Klimaszenarien an Standorten, an denen die Kiefer verbleibt, diese Bestände unter dem Einfluss der prognostizierten Klimaänderungen zu stärkeren Treibhausgasquellen werden, während sich die Buchen- und Eichen-Reinbestände

in beiden Szenarien hin zu niedrigeren Gesamt-Treibhausgas-Quellen entwickeln dürften. Besonders bemerkenswert ist, dass sich in diesen Beständen die Quellstärke für N₂O rückläufig entwickelt.

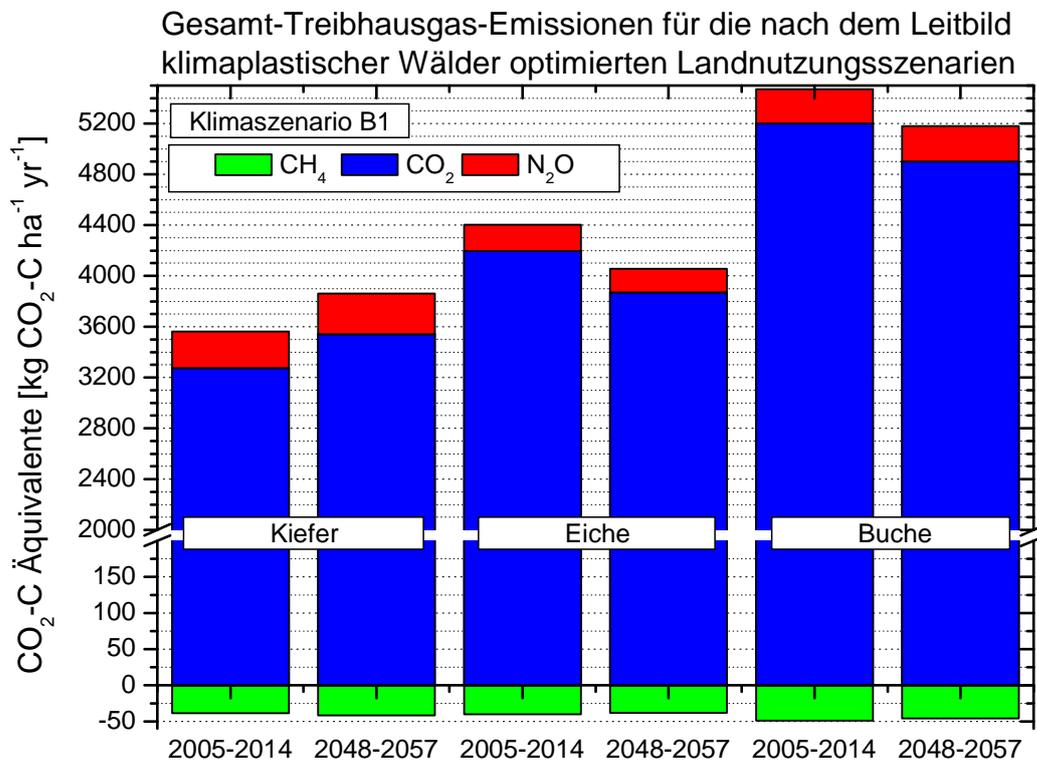


Abbildung 21: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen (Summe aus CO₂, N₂O, CH₄) der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (ausgedrückt in CO₂-C-Äquivalenten) für das Klimaszenario B1, wenn kein/e Überführung/Umbau der Bestände erfolgt, jeweils für die Simulationsjahre 2005-2014 und 2048-2057.

Abbildung 22 zeigt die Simulationsergebnisse zum Nitrataustrag unterhalb der Wurzelzone für das Klimaszenario A1B für die Simulationszeiträume 2005-2014, 2048-2057 sowie 2091-2100 für die unterschiedlichen Landnutzungsszenarien unter optimalen standortsangepassten Rahmenbedingungen.

Die Abbildung zeigt, dass in den zunächst noch „jungen“ Beständen nach erfolgtem Umbau (Alter 27 Jahre) sowohl beim Umbau von Kiefernbeständen in Buchenbestände als auch beim Umbau von Kiefernbeständen in Eichenbestände der Nitrataustrag unterhalb der Wurzelzone noch zunimmt, wobei jedoch der Nitrataustrag im Falle des Umbaus von Kiefernbeständen in Eichenbestände geringer ausfällt als beim Umbau von Kiefernbeständen in Buchenbestände.

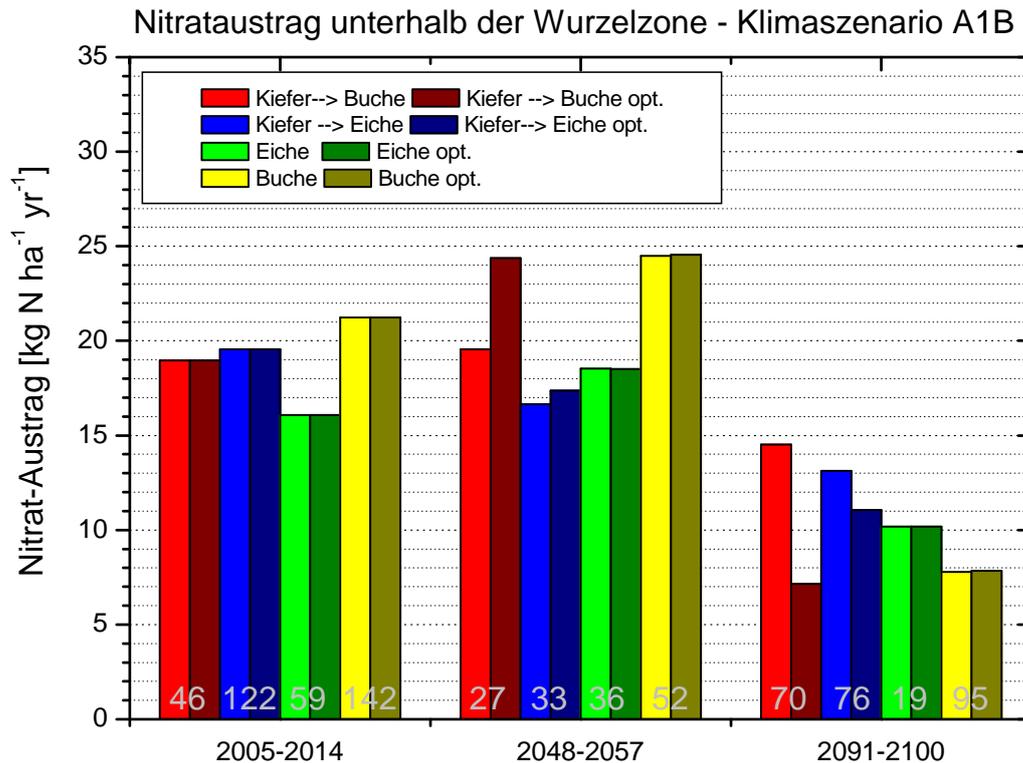


Abbildung 22: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Nitrat-Austräge unterhalb der Wurzelzone für das Klimaszenario A1B für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 und 2091-2100 für die jeweiligen Landnutzungsszenarien unter optimal standortsangepassten Bedingungen: Überführung Kiefer-Reinbestände in Buchenmischwälder; Überführung Kiefer-Reinbestände in Eichenmischwälder, Eiche bleibt Eiche und Buche bleibt Buche. Wobei in dem Simulationszeitraum 2005-2014 der jeweilige Ausgangszustand (Kiefer-, Kiefer-, Eiche-, Buche-Reinbestände) vor Durchführung der Landnutzungsänderung dargestellt wird und in den Simulationszeiträumen 2048-2057 sowie 2091-2100 das Ergebnis der Auswirkung der erfolgten Landnutzungsänderung dargestellt wird (Vergleich Kiefer-Reinbestand vs. Buchen-Mischwald bzw. Eichen-Mischwald). Die Zahlen in den Doppelsäulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn der Simulationszeiträume.

Bestände, die keinem Umbau unterliegen, zeigen keine signifikant erhöhten oder reduzierten Nitratausträge.

Bei adulten Beständen wird unter Verwendung des Klimaszenarios A1B sowohl bei einem Umbau von Kiefernreinbeständen in standortoptimierte klimaplastische Buchen-Mischwälder wie auch Eichenmischwälder vom Modell eine deutliche Abnahme des Nitrataustrags unterhalb der Wurzelzone vorhergesagt.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen mit dem Klimaszenario A1B prognostiziert das Modell unter Anwendung des Klimaszenarios B1 zwar auch eine Abnahme der Nitratausträge unter der Wurzelzone für den Umbau von Kiefernreinbeständen in Buchenmischbestände, nicht jedoch für den Umbau in Eichenmischbestände (Abb. 23).

Insgesamt lassen die Prognosen die Schlussfolgerung zu, dass die Gefahr des Nitrataustrags in das Grundwasser beim Umbau von Kiefern-Reinbeständen in Laubmischwald-Bestände unter den prognostizierten veränderten Klimarahmenbedingungen langfristig betrachtet deutlich geringer ist als die Beibehaltung von Kiefernreinbeständen.

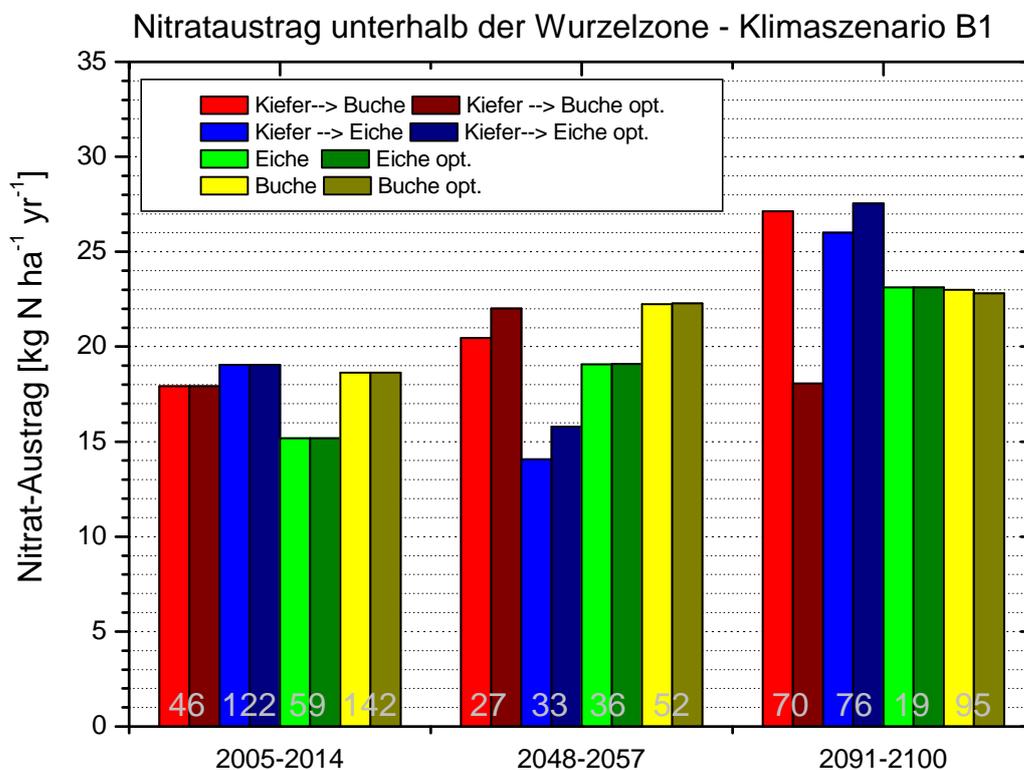


Abbildung 23: Mit dem adaptierten und validierten prozessorientierten Modell FOREST-DNDC simulierte Nitrat-Austräge unterhalb der Wurzelzone für das Klimaszenario B1 für die Simulationsjahre 2005-2014, 2048-2057 und 2091-2100 für die jeweiligen Landnutzungsszenarien unter optimal standortangepassten Bedingungen: Überführung Kiefer-Reinbestände in Buchenmischwälder; Überführung Kiefer-Reinbestände in Eichenmischwälder, Eiche bleibt Eiche und Buche bleibt Buche. Wobei in dem Simulationszeitraum 2005-2014 der jeweilige Ausgangszustand (Kiefer-, Kiefer-, Eiche-, Buche-Reinbestände) vor Durchführung der Landnutzungsänderung dargestellt wird und in den Simulationszeiträumen 2048-2057 sowie 2091-2100 das Ergebnis der Auswirkung der erfolgten Landnutzungsänderung dargestellt wird (Vergleich Kiefer-Reinbestand vs. Buchen-Mischwald bzw. Eichen-Mischwald). Die Zahlen in den Doppelsäulen repräsentieren das Alter der Bestände zu Beginn der Simulationszeiträume.

8 Zitierte Literatur

- Augustin, J., Merbach, W., Schmidt, W., Reining, E.: Effect of changing temperature and water table on trace gas emissions from minerotrophic mires. *Angew. Bot.* **70**: 45-51 (1996).
- Barracough, D.: ¹⁵N isotope dilution technique to study soil nitrogen transformations and plant uptake. *Fertil. Res.* **42**: 185-192 (1995).
- Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Breuer, L., Papen, H.: Fluxes of NO and N₂O from temperate forest soils: impact of forest type, N deposition and of liming on the NO and N₂O emissions. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **48**: 79-90 (1997).
- Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Huber, Ch., Kreutzer, K., Papen, H.: Impact of N-input by wet deposition on N-trace gas fluxes and CH₄-oxidation in spruce forest ecosystems of the temperate zone in Europe. *Atmos. Environ.* **32**: 559-564 (1998).
- Butterbach-Bahl, K., Stange, F., Papen, H., Li, C.: Regional inventory of nitric oxide and nitrous oxide emissions for forest soils of southeast Germany using the biogeochemical model PnET-N-DNDC. *J. Geophys. Res.* **106**: 34155-34166 (2001).
- Butterbach-Bahl, K., Papen, H.: Four years continuous record of CH₄-exchange between the atmosphere and untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany. *Plant Soil* **240**: 77-90 (2002).
- Butterbach-Bahl, K., Rothe, A., Papen, H.: Effect of tree distance on N₂O and CH₄-fluxes from soils in temperate forest ecosystems. *Plant Soil* **240**: 91-103 (2002a).
- Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Willibald, G., Papen, H.: Exchange of N-gases at the Höglwald Forest – A summary. *Plant Soil* **240**: 117-123 (2002b).
- Butterbach-Bahl, K., Breuer, L., Gasche, R., Willibald, G., Papen, H.: Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands. 1. Fluxes of N₂O, NO/NO₂ and CH₄ at forest sites with different N-deposition. *For. Ecol. Manage.* **167**: 123-134 (2002c).
- Butterbach-Bahl, K., Kesik, M., Miehle, P., Papen, H., Li, C.: Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based models. *Plant Soil* **260**: 311-329 (2004).
- Dannenmann, M., Gasche, R., Ledebuhr, A., Papen, H.: Effects of forest management on soil N cycling in beech forests stocking on calcareous soils. *Plant Soil* **287**: 279-300 (2006).
- Davidson, E.A., Hart, S.C., Shanks, C.A., Firestone, M.K.: Measuring gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification by ¹⁵N isotopic pool dilution in intact soil cores. *J Soil Sci* **42**: 335-349 (1991).
- Firestone, M.K., Davidson, E.A.: Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: "Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere" (Andreae, M.O. and Shimel, D.S., eds.), pp. 7-21, Wiley and Sons Ltd., Chichester. (1989)
- Gasche, R., Papen, H.: A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 2. NO and NO₂-fluxes. *J. Geophys. Res.* **104**: 18505-18520 (1999).
- Gasche, R., Papen, H.: Spatial variability of NO and NO₂ flux rates from soil of spruce and beech forest ecosystems. *Plant Soil* **240**: 67-76 (2002).
- Geßler, A., Jung, K., Gasche, R., Papen, H., Heidenfelder, A., Börner, E., Metzler, B., Augustin, S., Hildebrand, E., Rennenberg, H.: Climate and forest management influence nitrogen balance of European beech forests: microbial N transformations and inorganic N net uptake capacity of mycorrhizal roots. *Eur. J. For. Res.* **124**: 95-111 (2005).
- Grant, R.F., Patey, E.: Modeling variability in N₂O emissions from fertilized agricultural fields. *Soil Biol. Biochem.* **35**: 225-243 (2003).
- Grote, R.: A modular simulation environment to assess interacting environmental impacts on plants. Abstract book: 'Critical levels of ozone: Further applying and developing the flux-based concept'. Obergrugl, Austria, 82-87 (2005).
- Gützloe A., 2009, Regionale Quantifizierung der Auswirkungen der Etablierung standortplastischer Laubmischwälder auf C-/N-Umsatz, -Speicherung und Treibhausgasbilanz in der Modellregion Brandenburg/Mecklenburg-Vorpommern. Inaugural-Dissertation bei der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg., 196 pp..

- Huttunen, J.T., Nykänen, H., Martikainen, P.J., Nieminen, M.: Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland. *Plant Soil* **255**: 457-462 (2003).
- Ingwersen, J., Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Richter, O., Papen, H.: Barometric process separation: New method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**: 117-128 (1999).
- Jacob, D.: REMO A1B Scenario run, UBA Project, 0.088 degree resolution, run no. 006211, 1H data. CERA-DB "REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H", http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H. (2005).
- Jacob, D.: REMO B1 Scenario run, UBA Project, 0.088 degree resolution, run no. 006212, 1H data. CERA-DB "REMO_UBA_B1_1_R006212_1H", http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_B1_1_R006212_1H. (2005).
- Jenssen, M., Butterbach-Bahl, K., Hofmann, G., Papen, H.: Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands. 2. A novel approach to scale up N₂O- and NO-fluxes from forest soils by modelling their relationships to vegetation structure. *For. Ecol. Manage.* **167**: 135-147 (2002a).
- Jenssen, M., Hofmann, G., Anders, S., Butterbach-Bahl, K., Papen, H.: Flächenhafte Quantifizierung von N-Spuren-Emissionen in Wäldern. In: Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft: Herausforderung für Wissenschaft, Politik und Praxis (Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung, Ed.), Band 34, DLG-Verlags-GmbH Frankfurt, 139-144 (2002b).
- Kesik, M., Ambus, P., Baritz, R., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Damm, M., Duyzer, J., Horvath, L., Kiese, R., Kitzler, B., Leip, A., Li, C., Pihlatie, M., Pilegaard, K., Seufert, G., Simpson, D., Skiba, U., Smiatek, G., Vesala, T., Zechmeister-Boltenstern, S.: Inventories of N₂O and NO emissions from European forest soils. *Biogeosciences* **2**: 353-375 (2005).
- Kirkham, D., Bartholomew, W.V.: Equations for following nutrient transformations in soil, utilizing tracer data. *Soil Sci Soc Am J* **18**: 33-34 (1954).
- Li, C., Frolking, S., Frolking, T.A.: A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 9759-9776 (1992).
- Li, C., Aber, J., Stange, F., Butterbach-Bahl, K., Papen, H.: A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. *J. Geophys. Res.* **105**: 4369-4384 (2000).
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J., Martikainen, P.J.: Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biol. Biochem.* **35**: 1-12 (2003).
- Menyailo, O.V., Hungate, B.A., Zech, W., 2002. The effect of single tree species on soil microbial activities related to C and N cycling in the Siberian artificial afforestation experiment - Tree species and soil microbial activities. *Plant Soil* **242**: 183-196.
- Papen, H., Butterbach-Bahl, K.: A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 1. N₂O emissions. *J. Geophys. Res.* **104**: 18487-18503 (1999).
- Papen, H., Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Willibald, G.: Waldumbau und seine Auswirkungen auf den Biosphäre-Atmosphäre-Austausch von N₂ sowie klimawirksamen N-Spuren gasen (N₂O, NO, NO₂): Ergebnisse aus dem Nordostdeutschen Tiefland. *Beitr. Fortwirtsch. u. Landsch.ökol.* **38**: 68-73 (2004).
- Papen, H., Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Zumbusch, E., Willibald, G., Nübling, J.: Abschlußbericht BMBF-FKZ 0339729A: „Umwandlung von Kiefernreinbeständen in Kiefern-Buchen-Mischwälder: Auswirkungen auf mikrobielle N- und C-Umsetzungen sowie gasförmige N- und C-Verluste“, FZK Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen (2003).
- Papen, H., von Berg, R.: A most probable number method (MPN) for the estimation of cell numbers of heterotrophic nitrifying bacteria in soil. *Plant Soil* **199**: 123-130 (1998).
- Papke, H., Papen, H.: Influence of acid rain and liming on fluxes of NO and NO₂ from forest soil. *Plant Soil* **199**: 131-139 (1998).

- Parton, W.J., Mosier, A.R., Ojima, D.S., Valentine, D.W., Schimel, D.S., Weier, K., Kulmala, A.E.: Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 401-412 (1996)
- Parton, W.J., Holland, E.A., Del Grosso, S.J., Hartman, M.D., Martin, R.E., Mosier, A.R., Ojima, D.S., Schimel, D.S.: Generalized model for Nox and N₂O emissions from soils. *Journal of Geophysical Research* **106**, 17,403-17,419 (2001).
- Rennenberg, H., Kreuzer, K., Papen, H., Weber, P.: Consequences of high loads of nitrogen for spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forests. *New Phytol.* **139**: 71-86 (1998).
- Rennenberg, H., Störmer, H., Weber, P., Daum, M., Papen, H.: Competition of spruce trees for substrates of microbial N₂O-production and -emission in a forest ecosystem. *J. Appl. Bot.* **75**: 101-106 (2001).
- Rosenkranz, P., Brüggemann, N., Papen, H., Xu, Z., Seufert, G., Butterbach-Bahl, K.: N₂O, NO and CH₄ exchange, and microbial N turnover over a Mediterranean pine forest soil. *Biogeosciences* **3**: 121-133 (2006).
- Roulet, N.T.: Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands* **20**: 605-615 (2000).
- Rückauf, U., Augustin, J., Russow, R., Merbach, W.: Nitrate removal from drained and reflooded fen soils affected by soil N transformation processes and plant uptake. *Soil Biology Biochem.* **36**: 77-90 (2004).
- Schulla J., Jasper K., 2000, Model Description WaSiM-ETH, Institute for Geography, ETH, Zürich, 167 pp..
- Sommer, M., Fiedler, S., Glatzel, S., Kleber, M.: First estimates of regional (Allgäu, Germany) and global CH₄ fluxes from wet colluvial margins of closed depressions in glacial drift areas. *Agriculture Ecosys. Environ.* **103**: 251-257 (2004).
- Stange, F., Butterbach-Bahl, K., Papen, H., Zechmeister-Boltenstern, S., Li, C., Aber, J.: A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 2. Sensitivity analysis and validation. *J. Geophys. Res.* **105**: 4385-4398 (2000).
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S.: An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* **19**: 703-707 (1987).
- Williams, E.J., Hutchinson, G.L., Fehsenfeld, F.C.: NO_x and N₂O emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycl.* **6**: 351-388 (1992).

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen von umfangreichen Experimental- wie Modellierungsarbeiten erarbeiteten Ergebnisse sind von Bedeutung für die Ableitung von Handlungsempfehlungen für einen nachhaltigen Waldumbau in der Modellregion bei Umsetzung des Leitbilds zur Etablierung standortoptimierter klimaplastischer Laubmischwälder, der auch dem Schutz der Ressourcen Atmosphäre und Hydrosphäre Rechnung trägt. Die Ergebnisse sind verwendbar für die Forstpraxis, insbesondere hinsichtlich des erzielten Ergebnisses, wonach der Umbau von Kiefern-Reinbeständen in standortoptimierte klimaplastische Laubmischbestände insofern zu empfehlen ist, als die Umsetzung dieses Leitbilds - gerade auch unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes (Schutz der Ressource Atmosphäre) – zu einer günstigeren ökosystemaren Gesamt-Treibhausbilanz wie auch unter dem Gesichtspunkt des Schutzes der Ressource Hydrosphäre zu niedrigeren Nitrat-Austrägen unterhalb der Wurzelzone und damit zu einer

besseren N-Nährstoff-Retention am Standort führt. Darüber hinaus steht mit dem validierten prozess-orientierten Modell ein Tool zur Verfügung, mit dem detaillierte regionale Kataster der Gesamt-Treibhausgas-Bilanzen berechnet werden können.

10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen sind nicht bekannt geworden.

11 Erfolgte/geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Im Rahmen dieses Vorhabens ist eine umfangreiche Dissertation entstanden, die im Juli 2009 bei der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg. eingereicht wurde (Erst-Betreuer, Erst-Gutachter und Erst-Prüfer: Prof. Dr. Hans Papen, Projektleiter des vorliegenden Projekts).

Es ist vorgesehen, sowohl die im Rahmen der Doktorarbeit wie aus den Modellierungsarbeiten erzielten Ergebnisse noch in 2009 auf einer internationalen Tagung vorzustellen (geplant: AGU Fall Meeting, San Francisco, Dezember 2009) und in 2009/2010 mehrere Manuskripte bei renommierten begutachteten Zeitschriften zur Veröffentlichung einzureichen.