



## Schriftenreihe

Claus Florian Stange

Entwicklung und Anwendung eines prozeßorientierten Modells zur Beschreibung der  $N_2O$ - und  $NO$ -Emissionen aus Böden temperater Wälder

Herausgeber: Prof. Dr. Wolfgang Seiler  
Fraunhofer-Institut Atmosphärische Umweltforschung  
Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen  
Garmisch-Partenkirchen, 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Stange, Claus Florian:*

Entwicklung und Anwendung eines prozeßorientierten Modells zur  
Beschreibung der N<sub>2</sub>O- und NO-Emissionen aus Böden temperater Wälder /  
Claus Florian Stange. Aachen : Shaker, 2001

(Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts Atmosphärische Umweltforschung ;  
Bd. 2001,69)

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9142-9

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9142-9

ISSN 1436-1094

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Für  
Jan, Benjamin und Marc



---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	1
<b>1.1</b>	<b>ÖKOLOGISCHE BEDEUTUNG DES SPURENGASES N<sub>2</sub>O</b> .....	1
<b>1.2</b>	<b>ÖKOLOGISCHE BEDEUTUNG DES SPURENGASES NO</b> .....	3
<b>1.3</b>	<b>N-UMSETZUNGSPROZESSE IM BODEN</b> .....	6
<b>1.4</b>	<b>EINSATZMÖGLICHKEITEN VON PROZEBORIENTIERTEN MODELLEN</b> .....	8
<b>2</b>	<b>MODELLENTWICKLUNG VON PNET-N-DNDC</b> .....	11
<b>2.1</b>	<b>ALLGEMEINE ÜBERSICHT</b> .....	11
<b>2.2</b>	<b>DAS PARAMETER-EINGABEPROGRAMM FÜR PNET-N-DNDC</b> .....	15
2.2.1	Allgemeines .....	15
2.2.2	Witterungsdaten .....	15
2.2.3	Bestandesdaten .....	17
2.2.4	Bodendaten .....	21
2.2.5	Waldmanagement .....	24
<b>2.3</b>	<b>DAS WALDWACHSTUM-MODUL</b> .....	24
2.3.1	Absterben der pflanzlichen Biomasse (F_senes) .....	24
2.3.2	Verteilung der abgestorbenen Biomasse (Alloc_litter_into_pools).....	25
2.3.3	Stickstoffaufnahme der Pflanzen (n_uptake) .....	25
<b>2.4</b>	<b>DAS BODENKLIMA-MODUL</b> .....	28
2.4.1	Bodentemperatur (soil_temp_profile).....	28
2.4.2	Transpiration (hourly_transp_and_water_stress).....	32
2.4.3	Interzeption (rain_intercept).....	32
2.4.4	Bodenwasserfluß (water_delivery) .....	33
2.4.5	Stofftransport (leaching).....	34
2.4.6	Sauerstoffdiffusion (O <sub>2</sub> -diffusion).....	35
<b>2.5</b>	<b>DAS MINERALISATIONS-MODUL</b> .....	36
2.5.1	Mineralisation (x_decomp) .....	36
<b>2.6</b>	<b>DAS NITRIFIKATIONS-MODUL</b> .....	39
2.6.1	Populationsdynamik der Nitrifizierer (decomp_microbes) .....	40
2.6.2	Nitrifikation (nitrification).....	42

---

<b>2.7</b>	<b>DAS DENITRIFIKATIONS-MODUL</b> .....	46
2.7.1	Der „anaerobic balloon“.....	47
2.7.2	Denitrifikation (denitrification).....	49
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSE DES MODELLS</b> .....	55
3.1	TEMPERATUR.....	55
3.2	NIEDERSCHLAG.....	57
3.3	N-EINTRAG ÜBER DIE ATMOSPHERE.....	59
3.4	BODENFRUCHTBARKEIT.....	61
3.5	PHOTOSYNTHETISCH AKTIVE STRALUNG (PAR).....	63
3.6	BAUMART.....	65
3.7	HUMUSTYP.....	67
3.8	BODENART.....	69
3.9	ORGANISCHER KOHLENSTOFFGEHALT DES BODENS (SOC).....	70
3.10	PH-WERT DES BODENS.....	72
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE DER MODELLVALIDIERUNG</b> .....	75
4.1	HARTLAUBWALD IM HARVARD FOREST.....	77
4.2	FICHTENFLÄCHEN IM HÖGLWALD.....	78
4.3	BUCHENFLÄCHEN IM HÖGLWALD.....	86
4.4	FICHTENSTANDORT IN DER NÄHE VON KOPENHAGEN.....	92
4.5	BUCHENSTANDORT KLAUSEN-LEOPOLDSDORF.....	93
4.6	BUCHENSTANDORT SCHOTTENWALD.....	95
4.7	BUCHENSTANDORT IM SOLLING.....	97
4.8	FICHTENSTANDORT BEI VILLINGEN.....	99
4.9	KIEFERNWALDSTANDORT HUBERTUSSTOCK.....	102
4.10	KIEFERNWALDSTANDORT WILDBAHN.....	104
4.11	ZUSAMMENFASSUNG.....	106
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b> .....	109
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	129
<b>7</b>	<b>LITERATUR</b> .....	131

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abb. 1:</b>	Schematische Darstellung des N-Kreislaufs im Boden .....	6
<b>Abb. 2:</b>	Schematische Darstellung des Modells PnET-N-DNDC.....	12
<b>Abb. 3:</b>	Flußdiagramm des BASIC Eingabeprogramms von PnET-N-DNDC .....	16
<b>Abb. 4:</b>	Verteilung der abgestorbenen Biomasse in die drei Kohlenstoff-Pools in Abhängigkeit vom C/N-Verhältnis .....	19
<b>Abb. 5:</b>	Darstellung der gemessene Temperaturabhängigkeit der Stickstoffaufnahme durch Buchen und der angepaßte O'Neill-Funktion.....	27
<b>Abb. 6:</b>	Verhältnis zwischen Bodenwasser und Bodeneis in Abhängigkeit von der Bodentemperatur .....	31
<b>Abb. 7:</b>	Beschreibung des Feuchte- und des Bodentemperatureinflusses auf die Mineralisierung in PnET-N-DNDC .....	38
<b>Abb. 8:</b>	Größe des aeroben und des anaeroben Bodenbereiches in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes im Boden.....	48
<b>Abb. 9:</b>	Abhängigkeit der relativen Stoffaustauschrate zwischen dem aeroben und dem anaeroben Bodenbereich in Abhängigkeit von der Größe des anaeroben Bodenbereichs .....	49
<b>Abb. 10:</b>	Abhängigkeit der NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Reduktion, der NO-Reduktion und der N <sub>2</sub> O-Reduktion vom pH-Wert in dem Modell PnET-N-DNDC .....	53
<b>Abb. 11:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf die Lufttemperaturänderung .....	56
<b>Abb. 12:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf die Niederschlagsmenge .....	58
<b>Abb. 13:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf die Stickstoffkonzentration im Niederschlag.....	60
<b>Abb. 14:</b>	Beziehung zwischen der N-Konzentration im Niederschlag und dem Eingabeparametern Bodenfruchtbarkeit für die neun untersuchten Waldstandorte.....	61
<b>Abb. 15:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf den Parameters Bodenfruchtbarkeit .....	62
<b>Abb. 16:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR).....	64
<b>Abb. 17:</b>	Einfluß der Baumart auf die Größe des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden .....	66
<b>Abb. 18:</b>	Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden gegenüber der Änderung des Humustyps.....	68

---

<b>Abb. 19:</b> Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden gegenüber der Bodenart.....	69
<b>Abb. 20:</b> Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf Änderungen des organischen Kohlenstoffgehaltes im Boden (SOC) .....	71
<b>Abb. 21:</b> Sensitivität des anaeroben Bodenbereiches (ANVF), der N-Umsetzungsprozesse sowie der N-Gasproduktion im Boden auf den Boden-pH-Wert .....	73
<b>Abb. 22:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen im Jahr 1989 am Standort Harvard Forest, Massachusetts, USA .....	77
<b>Abb. 23:</b> Vergleich zwischen der gemessenen und der mit PnET-N-DNDC simulierten CO <sub>2</sub> -Emission der auf der Fichtenfläche im Höglwald für die Jahre 1995-1997 .....	79
<b>Abb. 24:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Fichtenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1995 .....	81
<b>Abb. 25:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Fichtenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1996 .....	83
<b>Abb. 26:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Fichtenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1997 .....	85
<b>Abb. 27:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Buchenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1995 .....	87
<b>Abb. 28:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Buchenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1996 .....	89
<b>Abb. 29:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N-Spurengasemissionen aus der Buchenfläche des Standortes Höglwald im Jahr 1997 .....	91
<b>Abb. 30:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Fichtenbestand in der Nähe von Kopenhagen, Dänemark, im Jahr 1992.....	92
<b>Abb. 31:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Buchenbestand des Standortes Klausen-Leopoldsdorf, Österreich, im Jahr 1996 .....	93
<b>Abb. 32:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Buchenbestand des Standortes Klausen-Leopoldsdorf, Österreich, im Jahr 1997 .....	94
<b>Abb. 33:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Buchenbestand des Standortes Schottenwald, Österreich, im Jahr 1996 .....	96

---

<b>Abb. 34:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Buchenbestand des Standortes Schottenwald, Österreich, im Jahr 1997 .....	97
<b>Abb. 35:</b> Jahresverlauf der Lufttemperatur und des Niederschlages sowie der Vergleich der simulierten und gemessenen N <sub>2</sub> O-Emissionen eines 135 Jahre alten Buchenstand und einer Lichtung am Standort Solling, Deutschland, im Jahr 1992.....	98
<b>Abb. 36:</b> Jahresverlauf der Lufttemperatur und des Niederschlages sowie der Vergleich der simulierten und gemessenen N <sub>2</sub> O-Emissionen einer gedüngten und einer ungedüngten Fichtenfläche des Standortes Villingen, Deutschland, im Jahr 1994 .....	100
<b>Abb. 37:</b> Jahresverlauf der Lufttemperatur und des Niederschlages sowie der Vergleich der simulierten und gemessenen N <sub>2</sub> O-Emissionen einer gedüngten und einer ungedüngten Fichtenfläche des Standortes Villingen, Deutschland, im Jahr 1995 .....	101
<b>Abb. 38:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Kiefernbestand des Standortes Hubertusstock, Deutschland, im Jahr 1996 .....	102
<b>Abb. 39:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Kiefernbestand des Standortes Hubertusstock, Deutschland, im Jahr 1997 .....	103
<b>Abb. 40:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Kiefernbestand des Standortes Wildbahn, Deutschland, im Jahr 1996.....	104
<b>Abb. 41:</b> Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der gemessenen und simulierten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus dem Kiefernbestand des Standortes Wildbahn, Deutschland, im Jahr 1997.....	105
<b>Abb. 42:</b> Vergleich der aus Freilandmessungen ermittelten und der mit PnET-N-DNDC berechneten mittleren Tagesemissionen von N <sub>2</sub> O und NO für die zehn Standorte.....	111

---

**TABELLENVERZEICHNIS**

<b>Tab. 1:</b>	Die wichtigsten durch den Menschen beeinflussten Treibhausgase.....	1
<b>Tab. 2:</b>	Geschätzte Quell- und Senkenstärke von N <sub>2</sub> O .....	2
<b>Tab. 3:</b>	Geschätzte Quell- und Senkenstärke von NO .....	5
<b>Tab. 4:</b>	Bodenparameterwerte der in PnET-N-DNDC verwendeten Bodenarten .....	22
<b>Tab. 5:</b>	Eingabeparameter für die zehn zur Validierung von PnET-N-DNDC benutzten Waldstandorte der temperaten Zone .....	76
<b>Tab. 6:</b>	Vergleich der von PnET-N-DNDC berechneten mittleren N <sub>2</sub> O-Emission mit den auf den zehn Waldstandorten gemessenen mittleren N <sub>2</sub> O-Emission aus dem Boden .....	107
<b>Tab. 7:</b>	Vergleich der von PnET-N-DNDC berechneten mittleren NO-Emission mit im Höglwald gemessenen über das Jahr gemittelten NO-Emission. ....	108

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr	IPCC	Intergovernmental Panel on
abb.	abbaubar		Climatic Change
Abb.	Abbildung	J	Joule [J]
AMO	Ammoniak-Monooxygenase	K	Kelvin
ANVF	anaerober Bodenbereich	l	Liter [ $10^{-3} \text{ m}^3$ ]
BTG	Bodentrockengewicht [g]	LAI	Blattflächenindex [ $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ]
BWG	Bodenwassergehalt [ $\text{g g}^{-1}$ ]	lin.	linear
bzw.	beziehungsweise	log	dekadischer Logarithmus
C	Kohlenstoff	m	Meter [m]
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis	$\text{m}^2$	Quadratmeter [ $\text{m}^2$ ]
ca.	circa	$\text{m}^3$	Kubikmeter [ $\text{m}^3$ ]
CaCl	Kalziumchlorid	min	Minute [min]
CH <sub>4</sub>	Methan	n	Anzahl
CO	Kohlenmonooxid	N	Stickstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	n.s.	nicht signifikant
C <sub>org</sub>	organischer Kohlenstoff	N <sub>2</sub>	Distickstoff
D	Tag	N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid (Lachgas)
DBM	Bodendichte	NH <sub>2</sub> OH	Hydroxylamin
d.h.	das heißt	NH <sub>3</sub>	Ammoniak
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
DNDC	Denitrification-Decomposition- Modell	NO	Stickstoffmonoxid
et al.	et alii (und andere)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrit
FBVA	Forstliche Bundesversuchs- Anstalt	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff	NOAA	National Oceanic and Atmos- pheric Administration
g	Gramm [g]	O <sub>2</sub>	Sauerstoff
h	Stunde [h]	O <sub>3</sub>	Ozon
H	Wasserstoff	p	Luftdruck [Pa]
ha	Hektar [ $10^4 \text{ m}^2$ ]	pH	negativer dekadischer Logarith- mus der H <sup>+</sup> -Konzentration
H <sub>2</sub> O	Wasser	Pa	Pascal [Pa]
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure	Par.	Parameter
HO•	Hydroxylradikal	PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
HOR	Hydroxylamin-Oxidoreduktase	PnET	Photosynthesis-Evapo- transpiration-Modell
IFU	Fraunhofer Institut für Atmos- phärische Umweltforschung		

PnET-N- DNDC	Photosynthesis-Evapotranspiration-Nitrification-Denitrification-Decomposition-Modell	T	Temperatur [°C]
		Tab.	Tabelle
		USA	United States of America
pers.	persönlich	Vol	Volumen
ppbv	parts per billion of volume [ $10^{-9}$ ]	Vol %	Volumenprozent
ppmv	parts per million of volume [ $10^{-6}$ ]	v.a.	vor allem
Q	Temperatursensitivität [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	vgl.	vergleiche
$r^2$	Bestimmtheitsmaß	WFPS	wassergefülltes Porenvolumen
s	Sekunde	WHK	Wasserhaltekapazität
s	sorbiert	$\bar{x}$	Mittelwert
s.	siehe	z.B.	zum Beispiel
s.a.	siehe auch	z.T.	zum Teil
SD	Standardabweichung	%	Prozent [%]
SE	Standardfehler	‰	Promille [‰]
SKS	gesättigte Leitfähigkeit	<; <<	kleiner; wesentlich kleiner
SOC	organischer Kohlenstoff im Boden	>; >>	größer; wesentlich größer
s.u.	siehe unten	°	Grad
t	Zeit	°C	Grad Celsius

### Vorsilben

n	Nano- [ $10^{-9}$ ]	k	Kilo- [ $10^3$ ]
$\mu$	Mikro- [ $10^{-6}$ ]	T	Tera- [ $10^{12}$ ]
m	Milli- [ $10^{-3}$ ]		
c	Centi- [ $10^{-2}$ ]		