

**CABIN: Ein Modell der
Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen
Gaswechsels zur Berechnung der NPP
in Modellen des globalen
C-N-Kreislaufs**

Inaugural Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
in den Naturwissenschaften
(Fachrichtung Biologie)
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Tim G. Reichenau

Oktober 2008

Dekan: Prof. Dr. Peter R. Schreiner

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Gerd Esser
2. Berichterstatter: HD Dr. Christoph Forreiter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Klimawandel, CO ₂ -Erhöhung und das Erdsystem	1
1.2	Stoffkreisläufe	2
1.2.1	Kohlenstoff	2
1.2.2	Nährstoffe im Allgemeinen	2
1.2.3	Die Rolle des Stickstoffs	3
1.2.4	C-N Interaktionen	3
1.3	Regulation des pflanzlichen C- und N-Haushalts	5
1.4	Untersuchung des globalen C- und N-Haushalts	6
1.4.1	Entwicklungsbedarf	6
1.4.2	Global einheitliche Parametrisierung.	7
1.4.3	Modelle des globalen C- und N-Kreislaufes	8
1.4.3.1	CENTURY	8
1.4.3.2	Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)	9
1.4.3.3	HYBRID	9
1.4.3.4	BIOME-BGC	10
1.4.3.5	Terrestrial Ecosystem Model (TEM)	10
1.4.3.6	Nitrogen Carbon Interaction Model (NCIM)	11
1.4.3.7	Fazit	11
1.5	Ziel und Fragestellung	11
2	Übernommene Modelle	13
2.1	Das Modell des globalen C- und N-Kreislaufs	13
2.2	Das Modell der stomatären Leitfähigkeit	13
2.2.1	Das Bodenwassermodell	14
2.3	Das Modell der Photosynthese von Kull und Kruijt	15
2.3.1	Modellbeschreibung	15
2.3.2	Temperaturabhängigkeit der Photosynthese	19
3	Materialien und Methoden	21
3.1	Das Modell CABIN	22
3.1.1	Kopplung mit den bestehenden Modellen	22
3.1.2	Überblick über CABIN	22
3.1.3	Phytomasse	23
3.1.4	Referenz- und Standardwerte	24
3.1.5	Erweiterung des Photosynthesemodells	25
3.1.6	Das Respirationmodell	26
3.1.6.1	Bedarfs- und angebotsorientierte Beschreibung	27

3.1.6.2	Einflussgrößen	28
3.1.6.3	Modellbildung	29
3.1.7	Das Speicherungsmodell	32
3.1.8	Das Allokationsmodell	33
3.1.9	Die Bilanzierung des interzellularen CO ₂	34
3.1.10	Die Nettoprimärproduktivität	35
3.1.11	Das Differentialgleichungssystem	35
3.1.12	Durchführung der Modellläufe	36
3.1.12.1	Modellkonfiguration	36
3.1.12.2	Rechenplattform	37
3.1.12.3	Initialisierung eines Modelllaufes	37
3.2	Vergleichsdaten	39
3.3	Eingabedaten	40
3.3.1	Phytomassen und Stickstoffmengen	40
3.3.2	Referenztemperatur	44
3.3.3	Atmosphärische CO ₂ -Konzentration	44
3.3.4	Wetterdaten	44
3.3.4.1	Strahlung	45
3.3.4.2	Niederschläge	45
3.3.4.3	Temperatur	48
3.3.4.4	Durchführung	48
3.3.4.5	Prüfen der Wetterdaten	48
3.4	Vorgehensweise	50
3.4.1	Prüfung der Teilmodelle	50
3.4.1.1	Photosynthesemodell	50
3.4.1.2	Respirationsmodell	50
3.4.1.3	Lebendes Gewebe im Holz	51
3.4.2	Anwendung von CABIN an den NPP-Stationen	51
3.4.3	Prüfung von CABIN	52
3.4.3.1	Prüfung von Teilergebnissen	52
3.4.3.2	Abweichungen von gemessenen NPP-Daten	53
3.4.4	Untersuchung der Bedeutung der Parameter	54
3.4.4.1	Auswirkung auf die Abweichung von der gemessenen NPP	55
3.4.4.2	Sensitivität von CABIN	56
3.4.4.3	Variierung der Speicherparameter	56
3.4.4.4	Ein Parametersatz für die weiteren Variierungsläufe	57
3.4.4.5	Variierung der Stickstoffabhängigkeit	58
3.4.4.6	Variierung der Temperaturabhängigkeit	59
3.4.4.7	Variierung der Menge lebenden Gewebes	61
3.4.4.8	Variierung des Grundumsatzes	62
3.4.4.9	Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Koh- lenhydratspeichern	62
4	Ergebnisse	65
4.1	Die neuen Teilmodelle	65
4.1.1	Erweiterungen des Photosynthesemodells	65
4.1.1.1	Optimumstemperatur der Photosynthese	65

4.1.1.2	Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern	66
4.1.2	Gleichungen des Respirationsmodells	66
4.1.2.1	Verringerung der Blattrespiration bei Licht	67
4.1.2.2	Respiration der einzelnen Kompartimente	67
4.1.2.3	Lebendes Gewebe im Holz	68
4.1.2.4	Parametrisierung	68
4.1.3	Gleichungen des Speicherungsmodells	72
4.1.3.1	Berechnung der Kapazitäten	72
4.1.3.2	Parametrisierung	73
4.1.4	Gleichungen des Allokationsmodells	73
4.2	Prüfung der Teilmodelle	74
4.2.1	Prüfung des Photosynthesemodells	74
4.2.2	Prüfung des Respirationsmodells	76
4.2.3	Lebendes Gewebe im Holz	76
4.3	Prüfung von CABIN	78
4.3.1	Teilergebnisse	78
4.3.2	Abweichungen von der gemessenen NPP	81
4.4	Bedeutung der Parameter	84
4.4.1	Abweichung von der gemessenen NPP	85
4.4.1.1	Parameter des Speicherungsmodells	85
4.4.1.2	Ein Parametersatz für die weiteren Modellläufe	89
4.4.1.3	Stickstoffabhängigkeit der Respiration	89
4.4.1.4	Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese	90
4.4.1.5	Q_{10} der Respiration	92
4.4.1.6	Optimumtemperatur der Photosynthese	93
4.4.1.7	Referenztemperatur	94
4.4.1.8	Lebendes Gewebe im Holz	94
4.4.1.9	Grundumsatz	95
4.4.1.10	Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern	97
4.4.2	Sensitivität von CABIN	98
5	Diskussion	101
5.1	Neuerungen in CABIN	101
5.2	Leistungsfähigkeit von CABIN	102
5.2.1	Teilergebnisse	102
5.2.2	Unsicherheiten in Eingabe- und Vergleichsdaten	103
5.2.2.1	Eingabedaten	104
5.2.2.2	Vergleichsdaten	105
5.2.2.3	Fazit	106
5.2.3	Abweichungen zwischen Modell und Messung	107
5.2.3.1	Abweichungen bei Grundparametrisierung	107
5.2.3.2	Analyse der Abweichungen	107
5.2.3.3	Beurteilung der Leistungsfähigkeit	109
5.3	Bedeutung der Parameter	110
5.3.1	Speicherung	111
5.3.2	Stickstoffabhängigkeit der Respiration	112
5.3.3	Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese	112

5.3.4	Temperaturabhängigkeit der Respiration	113
5.3.5	Temperaturabhängigkeit der Photosynthese	113
5.3.6	Referenztemperatur	114
5.3.7	Lebendes Gewebe im Holz	114
5.3.8	Grundumsatz	115
5.3.9	Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern	116
5.3.10	Zusammenfassung und Fazit	116
5.4	Global einheitliche Parametrisierung	117
5.4.1	Verfeinerung der Detaillierungsebene	117
5.4.1.1	Isolierung durch Schnee	118
5.4.1.2	Photosynthesebeginn nach Kältephasen	118
5.4.1.3	Temperaturunterschiede zwischen den Organen	118
5.4.1.4	Strahlungsabsorption und Effizienz der Nutzung	119
5.4.1.5	Nach Organen differenzierter Kohlenhydrathaushalt	119
5.4.1.6	Temperaturakklimatisierung	120
5.4.2	Anpassungen an Umweltbedingungen	120
5.4.2.1	Kohlenstoffeinsparung	120
5.4.2.2	Wurzeltiefe und Dormanz	121
5.4.2.3	Zusammenhang der Respiration mit der Stickstoffkonzentration	122
5.5	Ausblick	122
5.5.1	Weiteres Vorgehen	122
5.5.1.1	Parametrisierung	122
5.5.1.2	Modellerweiterungen	123
5.5.2	Datenerhebung	123
5.5.3	Forschungsbedarf	123
6	Zusammenfassung	125
A	Symbole und Einheiten	129
B	Modelle des globalen C- und N-Haushalts	135
B.1	CENTURY	135
B.2	Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)	136
B.3	HYBRID	136
B.4	BIOME-BGC	137
B.5	Terrestrial Ecosystem Model (TEM)	138
B.6	Nitrogen Carbon Interaction Model (NCIM)	139
C	Wetterdaten	141
C.1	Herleitung der Strahlungsdaten	141
C.1.1	Quelle der Messdaten.	141
C.1.2	Berechnung der Strahlung an den NPP-Stationen.	141
C.1.3	Jahresverlauf und Tagesgang für BSRN-Strahlungsdaten.	143
C.1.4	Jahresverlauf und Tagesgang für WRDC-Strahlungsdaten.	144
C.1.5	Berechnen der potentiellen Strahlung	145
C.1.5.1	Strahlung über der Atmosphäre	145
C.1.5.2	Potentielle Strahlung an der Oberfläche	145

C.2	Herleitung der Niederschlagsdaten	146
C.2.1	Quelle der Messdaten	146
C.2.2	Zeitlicher Verlauf	146
C.2.3	Ausnahmen	148
C.2.4	Interpolation der Niederschlagsdaten	149
C.3	Herleitung der Temperaturdaten	149
C.3.1	Quelle der Messdaten	149
C.3.2	Zeitlicher Verlauf	150
C.3.3	Ausnahmen	152
C.3.4	Höhenkorrektur	152
C.3.5	Schwierigkeiten	153
C.4	Prüfung der Wetterdaten	155
C.4.1	Aufbereitung der generierten Daten zu Prüfung	155
C.4.2	Beurteilung der generierten Wetterdaten	155
D	Prüfung des Bodenwasserpotentials	177
E	Bewertung von Modellläufen	181
F	Ergebnistabellen	183
G	Steady state Lösungen der Bilanzgleichung für c_i	193
G.1	Allgemeine Lösung	193
G.2	Die fünf Fälle des Photosynthesemodells	193
G.2.1	Erster Fall	193
G.2.2	Zweiter Fall	194
G.2.3	Dritter Fall	194
G.2.4	Vierter Fall	195
G.2.5	Fünfter Fall	196
G.2.6	Blattflächenindex LAI	196
H	Mittlere Jahrestemperaturen	197
	Literaturverzeichnis	203

Abbildungsverzeichnis

3.1	Koppelungsschema der Modelle	23
3.2	Aufbau von CABIN	24
3.3	Rufreihenfolge der Modellteile	38
4.1	Parametrisierung des Respirationssmodells	71
4.2	Vergleich der Photosynthesemodelle nach Farquhar und Kull & Kruijt	75
4.3	Parametrisierung des Respirationssmodells	77
4.4	Prüfung des Respirationssmodells	77
4.5	Plausibilitätstest bei Station 1552	79
4.6	Plausibilitätstest bei Station 80	80
4.7	Modellierte NPP: Vergleich mit Messdaten	83
4.8	NPP-Abweichungen gegen Ort und Klima	84
4.9	Quotient der Gaswechselflüsse und Phytomasse gegen Temperatur	85
4.10	NPP-Abweichung gegen Gaswechselflüsse und Kohlenhydrate	86
5.1	Vergleich der Modell-NPP von CABIN und HRBM mit Messwerten	108
5.2	Erkennen plausibler Ergebnisse	110
C.1	Interpolation unter Mittelwerterhaltung	150
C.2	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 1594, 1552, 1556, 1567	157
C.3	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 1009, 991, 709, 1379	158
C.4	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 1377, 1184, 773, 808	159
C.5	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 779, 105, 106, 164	160
C.6	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 271, 23, 56, 80	161
C.7	Prüfung der Wetterdaten, Stationen 66, 65, 634, 737	162
C.8	Prüfung der Wetterdaten, Station 885	163
D.1	Prüfung des Bodenwasserpotentials	178
D.2	Prüfung des Bodenwasserpotentials	179
D.3	Prüfung des Bodenwasserpotentials	180

Tabellenverzeichnis

2.2	Parameter Temperaturabhängigkeit Photosynthese 1	19
2.3	Parameter Temperaturabhängigkeit Photosynthese 2	20
3.1	Verringerung der Blattrespiration mit zunehmender Strahlung	32
3.2	Liste der NPP-Messorte (Stationen)	41
3.3	Von der Modellbeschreibung des HRBM abweichende Parameter	44
3.4	Datenquellen Strahlung	46
3.5	Datenquellen Niederschläge	47
3.6	Datenquellen Temperaturen	49
3.7	Parameter Speicherungsmodell	57
3.8	Parameter Stickstoffabhängigkeit der Respiration	58
3.9	Parameter Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese	60
4.1	Parameter Optimumstemperatur Photosynthese	66
4.2	Zur Parametrisierung des Respirationsmodells	70
4.3	Parameter Respirationsmodell	71
4.4	Parameter Lichthemmung Respiration	72
4.5	Photosynthesemodell: Vergleich mit Messdaten	75
4.6	Daten zu NPP-Vergleich und Abweichungsuntersuchung	82
4.7	Variierung der Speicherparameter	87
4.8	Extrema der Modell-NPP bei Speicherparameter	88
4.9	Stabile Parametrisierungen der N-Abhängigkeit der Respiration	90
4.10	Variierung der N-Abhängigkeit der Respiration	91
4.11	Variierung der N-Abhängigkeit der Photosynthese	92
4.12	Variierung der Temperaturabhängigkeiten	93
4.13	Variierung der Menge lebenden Gewebes	95
4.14	Variierung des Grundumsatzes	96
4.15	Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratpools	97
4.16	Relative Variationsbreite	98
5.1	Teilergebnisvergleich Modell und Literaturdaten	104
5.2	Vergleich modellierter und gemessenen Phytomassenverhältnisse	106
C.1	Zeitliche Verfügbarkeit der Strahlungsdaten	142
C.2	Zeitliche Verfügbarkeit der Niederschlagsdaten	147
C.3	Zeitliche Verfügbarkeit der Temperaturdaten	151
C.4	Höhenkorrektur der Temperaturdaten	154
C.5	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1594 und 1552)	164
C.6	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1556 und 1567)	165

C.7	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1009 und 991)	166
C.8	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 709 und 1379)	167
C.9	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1377 und 1184)	168
C.10	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 773 und 808)	169
C.11	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 779 und 105)	170
C.12	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 106 und 164)	171
C.13	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 271 und 23)	172
C.14	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 56 und 80)	173
C.15	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 66 und 65)	174
C.16	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 634 und 737)	175
C.17	Prüfung der Wetterdaten (Stationen 737 und 885)	176
F.1	Stationsdaten und NPP Vergleichsdaten	184
F.2	Modell-NPP Speicherparametrisierung 1	185
F.3	Modell-NPP Speicherparametrisierung 2	186
F.4	Modell-NPP Speicherparametrisierung 3	187
F.5	Modell-NPP Stickstoffabhängigkeit	188
F.6	Modell-NPP Stickstoffabhängigkeit	189
F.7	Modell-NPP Stickstoffabhängigkeit	189
F.8	Modell-NPP Stickstoffabhängigkeit	190
F.9	Modell-NPP Temperaturabhängigkeit	191
F.10	Modell-NPP lebendes Gewebe und Grundumsatz	192
H.1	Mittlere Jahrestemperatur für Schmithüsen-Vegetationstypen	197

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Klimawandel, CO₂-Erhöhung und das Erdsystem

Das Leben auf der Erde ist Teil eines komplexen Systems aus Energie- und Stoffkreisläufen. Dieses Erdsystem kann in drei große Teilsysteme unterteilt werden: die Atmosphäre mit dem Klimasystem, die Ozeane mit ihren zirkulierenden Wassermassen und den darin lebenden Organismen und die terrestrische Biosphäre mit den landlebenden Pflanzen, Tieren, Pilzen und Mikroorganismen. Alle Teilsysteme tauschen untereinander Stoffe und Energie aus, wobei die am Austausch beteiligten Prozesse aufeinander zurück wirken und sich oft gegenseitig beeinflussen. Gibt es Veränderung in einem Teilsystem oder einem Bestandteil eines der Teilsysteme, so können sich Auswirkungen auf das gesamte Erdsystem ergeben.

Messungen zeigen, dass es Veränderungen des Klimasystems und steigende Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) in der Luft gibt (IPCC, 2007) Beides wird miteinander in Verbindung gebracht:

Nach Ergebnissen des zwischenstaatlichen Ausschusses für den Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sind die anthropogenen Emissionen von CO₂ in die Atmosphäre durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffreserven (6,5 Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) pro Jahr nach Marland et al., 1999) die Hauptursache für die Veränderung des Klimas. Es wird davon ausgegangen, dass das zusätzliche Kohlendioxid den Energiehaushalt der Erde verändert. Indem es einen größeren Teil der von der Erde ausgehenden langwelligen Strahlung absorbiert, steigt die atmosphärische Gegenstrahlung zurück auf die Erdoberfläche, wodurch sich eine Erwärmung ergibt. Verschiedene Veränderungen des Klimas werden auf diese Erhöhung der Temperatur zurückgeführt (IPCC, 2007).

Das Klimasystem der Erde kann innerhalb weniger Jahrzehnte rapide Veränderungen durchmachen (Taylor, 1999). Es kann abrupte Wechsel zwischen verschiedenen stabilen Zuständen geben (Taylor, 1999). Dies kann Gefahren für die Menschheit bergen, weil sie in vieler Hinsicht von einem konstanten Klima abhängig ist. Insbesondere die landwirtschaftliche Produktion von Nahrungsmitteln und Rohstoffen wäre betroffen, aber auch das ökonomische System ist hier störanfällig (Tol et al., 2000; Fischer et al., 2002). Besonders vor dem Hintergrund eines deutlichen weltweiten Bevölkerungswachstums stellt ein Klimaumschwung eine solche Gefahr dar (Tol et al., 2000). Es ist daher von allgemeinem Interesse, eine Vorstellung davon zu bekommen, wie sich das Klima in Zukunft entwickeln könnte, um Vorbereitungen zur Vermeidung von eventuellen Katastrophen treffen zu können.

Aufgrund der Interaktionen und Rückkopplungen zwischen den Teilen des Erdsystems ist es nicht möglich, Auswirkungen von Veränderungen in einem Teilsystem – nämlich dem Klimasystem – abzuschätzen, ohne die Interaktion mit den anderen Teilen zu berücksichtigen. Wenn also prognostiziert werden soll, was für Veränderungen des Erdsystems auf die Menschheit zukommen könnten, müssen die Ozeane und die terrestrische Biosphäre mit in die Untersuchungen einbezogen werden.

1.2 Stoffkreisläufe

1.2.1 Kohlenstoff

Die Trockensubstanz der Lebewesen auf der Erde besteht zu einem Großteil aus Kohlenstoff (C). Autotrophe Lebewesen, wie die Pflanzen, erhalten ihn als anorganisches CO_2 aus der Atmosphäre. Sie dienen als Nahrung für die heterotrophen Lebewesen, die den nun in organischer Form vorliegenden Kohlenstoff aufnehmen und in ihre Körper einbauen oder ihn durch ihre Atmung wieder in die Atmosphäre abgeben. Auch temporär in den Lebewesen gebundener Kohlenstoff gelangt schließlich wieder als CO_2 in die Atmosphäre, wenn die abgestorbenen Gewebe durch Destruenten zersetzt werden.

Somit ist der Kohlenstoffkreislauf als zentraler Stoffkreislauf der Biosphäre auch Teil des Systems „Atmosphäre“ und steht durch die Wirkung des CO_2 auf den planetaren Energiehaushalt mit dem Klimasystem in Verbindung. Die Bestandteile des Systems „Kohlenstoffkreislauf“ sind weitgehend identifiziert und beschrieben. Pflanzen spielen eine der bedeutendsten Rollen, da sie 99 % der terrestrischen Biomasse ausmachen (Larcher, 1994).

Kohlenstoff erfüllt in den Pflanzen viele unterschiedliche Funktionen: Er ist an der Strukturbildung, z. B. als Cellulose, beteiligt, ist als Kohlenhydrat Edukt für zahlreiche Syntheseprozesse, dient als Energiespeicher und spielt eine Rolle als Informationsträger, da in der Zelle anhand des Kohlenstoffstatus (detektiert als Kohlenhydratkonzentration im Cytosol, siehe Geiger et al., 2000) regulatorische Vorgänge und die Genexpression beeinflusst werden (Geiger et al., 1998; Stitt und Krapp, 1999; Pego et al., 2000).

1.2.2 Nährstoffe im Allgemeinen

Die Phytomasse besteht neben Kohlenstoff aus einer Reihe weiterer Elemente. Die bedeutendsten sind Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel. Wasserstoff und Sauerstoff stehen den Pflanzen durch die Wasserspaltung im Rahmen der Photosynthese in großen Mengen zur Verfügung. Anders verhält es sich mit Phosphor, Schwefel und Stickstoff, die zumeist als Ionen aus der Bodenlösung aufgenommen werden müssen.

Für die Bildung neuer Phytomasse können die Verhältnisse der Elemente zueinander nicht beliebig variieren. Da diese Stoffe in bestimmten Mengen und Verhältnissen zum Leben einer Zelle notwendig sind, zeigt sich in der Natur nur eine geringe Variabilität der Elementverhältnisse, besonders wenn man gleiche Gewebetypen verschiedener Pflanzenfamilien betrachtet (Clüsener-Godt, 1989).

Auch die Auswirkung der andauernden Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration auf die Produktivität der Biosphäre hängt mit der Nährstoffsituation

zusammen. Eine Steigerung der Produktivität durch dieses erhöhte Kohlenstoffangebot kann nur stattfinden, wenn für die neu zu bildende Phytomasse auch Nährstoffe im notwendigen Verhältnis zum Kohlenstoff zur Verfügung stehen.

Für viele Ökosysteme der Erde ist gezeigt worden, dass die Limitierung der Produktivität durch das Stickstoffangebot bedingt ist (Vitousek und Howarth, 1991). Einwirkungen des Menschen darauf ergeben sich unter anderem durch Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen, und durch die Abgabe von Stickstoff in die Atmosphäre durch Verbrennungsprozesse (Vitousek et al., 1997).

1.2.3 Die Rolle des Stickstoffs

Der terrestrische Stickstoffkreislauf verläuft teilweise parallel zum Kohlenstoffkreislauf, hat aber keinen derart für die Vegetation zugänglichen atmosphärischen Pool. N wird von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und nach Reduktion in die Phytomasse eingebunden (Assimilation). Absterbende Pflanzenteile mit dem in ihnen enthaltenen Stickstoff werden zu Bestandesabfall, der von Mikroorganismen abgebaut werden kann. Der Stickstoff wird so Teil der Mikroorganismen, oder von diesen in mineralischer Form wieder in den Boden abgegeben (Mineralisierung). Zwei weitere Interaktionen existieren zwischen dem anorganischen Bodenstickstoff und den Mikroorganismen: Mikroorganismen nehmen N aus dem Bodenpool auf (Immobilisierung) und abgestorbene Mikroorganismen werden unter N-Freisetzung abgebaut. Durch mikrobielle N-Transformationen im Boden können auch gasförmige Stickstoffverbindungen wie N_2 oder N_2O in die Atmosphäre abgegeben werden.

Der Bodenpool ist der zentrale Pool dieses Systems. Neben den beschriebenen biologischen Zu- und Abflüssen gibt es die Deposition von N-Verbindungen aus der Atmosphäre. Diese stammen zumeist aus anthropogen verursachten Emissionen und gelangen mit dem Regen in den Boden. Regen verursacht auch den zweiten nicht biologischen Fluss, nämlich die Auswaschung von N mit dem Wasserfluss heraus aus dem für die Pflanzen erreichbaren Boden. Ein dritter Prozess, der in Böden mit hohen pH-Werten auftritt, ist Stickstoffverlust durch die Ausgasung von gasförmigem Ammonium.

Einige Mikroorganismen haben eine weitere Stickstoffquelle erschlossen. Sie können aus dem großen atmosphärischen N_2 -Pool Stickstoff durch Fixierung gewinnen. N_2 -Fixierung ist der bedeutendste Aufnahmeweg für Stickstoff ins System (Quispel, 1974). Dieser sehr energieaufwendige Prozess wird von den meisten Cyanophyta, Azotobacteriaceae und Rhizobiaceae, den Arten der Gattung *Azospirillum* und einigen anderen durchgeführt. Die Rhizobien leben dabei oft in Symbiose mit höheren Pflanzen, die diese mit Kohlenstoff versorgen und von den Bakterien Stickstoff erhalten. Die hier bedeutendste Pflanzenfamilie sind die Leguminosen (Lea, 1997).

1.2.4 C-N Interaktionen

Die Kreisläufe von Kohlenstoff und Stickstoff verlaufen nicht unabhängig voneinander. Bei den Umsetzungen, an denen Organismen beteiligt sind, gibt es Interaktionen.

Zum Abbau des Bestandesabfalls von organischen hin zu mineralischen Verbindungen benötigen die Destruenten Energie, die im Rahmen ihrer Respiration bereitgestellt wird. Die Prozesse, die mineralischen Stickstoff im Boden erzeugen, setzen al-

so Kohlenstoff frei. Eine Erhöhung des Kohlenstoffangebots für die Destruenten kann aufgrund der dann vermehrt zur Verfügung stehenden Energie zu einer Erhöhung der Immobilisierung von Stickstoff führen (Hungate, 1999). Die Nitrifikationsrate nimmt dabei ab. Unter anaeroben Bedingungen sind auch erhöhte Denitrifikationsraten zu erwarten (Payne, 1973; Vitousek et al., 1997). Auch die Fixierung von atmosphärischem N_2 ist vom Kohlenstoffangebot abhängig und kann unter erhöhtem CO_2 verstärkt sein (Hungate et al., 1999; Schortemeyer et al., 1999; Lüscher et al., 2000). Die Abbaurate des Bestandesabfalls nimmt mit dessen steigendem N-Gehalt zu (Wedin und Pastor, 1993; Knops et al., 2002).

Auch auf Ebene der Pflanzen gibt es Interaktionen zwischen den Kreisläufen des Stickstoffs und des Kohlenstoffs. Die Aufnahme von N aus dem Boden ist abhängig von der Energieversorgung und von der Versorgung mit Karbonsäuren, auf die der aufgenommene und nach Reduktion zu assimilierende Stickstoff übertragen werden kann (Lea, 1997). Ein erhöhtes Angebot von N in der Bodenlösung kann die Aufnahme verstärken (Scheible et al., 1997b).

Neben dem Einfluss des N-Angebots im Boden und der C-Verfügbarkeit in der Pflanze auf die N-Assimilation hat auf der anderen Seite auch das CO_2 -Angebot in der Atmosphäre und die N-Verfügbarkeit in der Pflanze Einfluss auf die C-Assimilation der Photosynthese. Diese steigt mit steigendem atmosphärischen CO_2 -Gehalt, hängt aber auch mit dem N-Gehalt des Blattes zusammen. Kattge (2002) konnte für die maximale Elektronentransportrate der Elektronentransportketten in den Thylakoidmembranen der Plastiden und die maximale Carboxylierungsrate des CO_2 assimilierenden Enzyms Rubisco einen linearen Zusammenhang mit der N-Konzentration im Blatt zeigen. Dieser Zusammenhang kann bei erhöhtem CO_2 -Angebot leicht verringert sein (Medlyn et al., 1999; Kattge, 2002). Der Anteil der zweiten von der Rubisco katalysierten Reaktion, der Oxygenierung, nimmt mit steigender CO_2 -Konzentration ab, was zu einer verstärkten C-Assimilation pro Stickstoff führt (Pettersson et al., 1993; Farage et al., 1998).

Einen weiteren Zusammenhang zwischen der Stickstoffkonzentration im Blatt und der Assimilation wird über die Stomata vermittelt. Kattge (2002) konnte einen proportionalen Zusammenhang zwischen der massenbezogenen maximalen Leitfähigkeit der Stomata und der N-Konzentration zeigen.

Eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre kann eine weitere Auswirkung auf die Stickstoffsituation der Pflanze haben. Die unter erhöhtem CO_2 weiter geschlossenen Stomata verursachen eine geringere Transpiration und somit auch eine geringere Aufnahme von Wasser aus dem Boden. Dadurch verringert sich der Wasserfluss in der Bodenlösung zu den Wurzeln hin und es wird weniger Stickstoff heran transportiert, wodurch sich die N-Aufnahme verringern kann (Conroy und Hocking, 1993; Vuuren et al., 1997). Hier zeigt sich die zentrale Rolle der Stomata, die in den Kreisläufen von C, N und Wasser von Bedeutung sind und auf diese Weise als bedeutendes regulatives Element im Stoffhaushalt der Pflanze eine wichtige Rolle spielen.

Auch bei der pflanzlichen Respiration lässt sich ein Zusammenhang mit der Stickstoffkonzentration finden (Kattge, 2002; Reich et al., 2006). Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht so deutlich wie bei der Photosynthese. Die Respiration pro Stickstoff ist abhängig vom Angebot an Kohlenstoff (in Form von Kohlenhydraten), insbesondere, wenn dieser verknüpft (Amthor, 1989).

1.3 Regulation des pflanzlichen C- und N-Haushalts

Grundsätzlich bestimmt das Nährstoffangebot, wieviel eine einzelne Pflanze an Phytomasse produzieren kann. Bei sonst gleichen Bedingungen erhöhen diejenigen Individuen ihre Phytomasse am meisten, die am meisten N aufnehmen konnten (Kattge, 2002). Liegt in der Bodenlösung ein Angebot an Nitrat vor, so wird dadurch in der Pflanze eine Förderung des Wurzelwachstums ausgelöst (Scheible et al., 1997b). Das in die Pflanze aufgenommene Nitrat stimuliert dann die Expression und Aktivität der Enzyme, die an der Nitratreduktion und der Ammoniumassimilierung beteiligt sind (Lin et al., 1994; Scheible et al., 1997b). Da Pflanzen die Konzentration an Nährstoffen in der Bodenlösung bis an die Nachweisgrenze verringern können (Olsen, 1950), ist die über die Zeit zur Verfügung stehende Menge und nicht die Konzentration der Nährstoffe in der Bodenlösung die ausschlaggebende Größe.

In der Pflanze konkurrieren einzelne Prozesse innerhalb von Zellen und, auf einer höheren räumlichen Skala, die verschiedenen Organe untereinander um den zur Verfügung stehenden Stickstoff. Dabei bestimmt die Allokation, also der Einbau des Stickstoffs in die Strukturphytomasse und Enzymausstattung eines Organs der Pflanze, wofür er genutzt wird. Durch Allokation in Blätter wird er zur Aufnahme von Kohlenstoff verwendet, während Allokation in die Wurzeln die Aufnahme von Nährstoffen fördert. Je geringer die N-Konzentration in der Pflanze ist, desto stärker wird in die Wurzeln auf Kosten von Spross und Blättern investiert (Robinson, 1986; Körner und Reinhardt, 1987; Kattge, 2002).

Die Hemmung der Expression von Genen für N aufnehmende Transporter in der Wurzel wird neben hohem Nitratangebot im Boden auch durch hohe Kohlenhydratkonzentrationen in der Pflanze gefördert und durch Produkte der N-Assimilation verursacht (Forde, 2000; Matt et al., 2001). Herrschen in der Pflanze hohe Nitratkonzentrationen, so wird der assimilierte Kohlenstoff verstärkt in die Bildung von Karbonsäuren und weniger in die Stärkesynthese investiert (Scheible et al., 1997a). Auf diese Weise kann die Priorität im Stoffwechsel zwischen Speicherung und Stickstoffwerb verschoben werden.

Glutathion als Endprodukt der N-Assimilierung hemmt die Nitrataufnahme in der Wurzel (Gojon et al., 1998). Analog dazu hemmen hohe Konzentrationen an Kohlenhydraten die Expression der Rubisco (Stitt, 1991). Die in der Pflanze mobilen Pools an Stickstoff und Kohlenstoff und deren Verhältnis zueinander regulieren so die Ressourcenverteilung in der Pflanze und führen dazu, dass die Pflanze immer ein für sie günstiges Verhältnis von C und N zueinander anstrebt.

Dies ist auch für die Produktivität der Pflanze von Bedeutung. Ob eine positive Kohlenstoffbilanz erreicht wird, hängt vom Verhältnis von Photosynthese zu Respiration ab. Dieses wiederum hängt mit dem Massenverhältnis der pflanzlichen Organe zueinander zusammen. Die Blätter müssen mehr Kohlenstoff durch Photosynthese assimilieren, als von den anderen Organen verbraucht wird. Wird also bei N-Mangel die Wurzel vergrößert, erhöht sich der Anteil respirierender Phytomasse an der Gesamtphytomasse. Wird zusätzlich mehr Energie in die N-Aufnahme investiert, so kann dies zumindest vorübergehend zu einer negativen C-Bilanz führen.

1.4 Untersuchung des globalen C- und N-Haushaltes

Die Rückkopplungen zwischen den einzelnen Teilsystemen des Erdsystems (Abschnitt 1.1) wie auch die Rückkopplungen innerhalb der Teilsysteme (oben anhand der C-N Interaktion in der terrestrischen Biosphäre dargestellt) machen es unmöglich, durch die isolierte Betrachtung von Einzelprozessen Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Systems zu gewinnen. Um ein verbessertes Verständnis des gesamten Systems zu bekommen müssen die Einzelprozesse mit ihren Verknüpfungen untereinander quantitativ betrachtet werden.

Eine Methode zur Beschreibung und Untersuchung solch komplexer Zusammenhänge ist die mathematische Modellierung des betreffenden Systems. Mit einem Modell können die einzelnen Erkenntnisse und vorliegenden Daten miteinander verknüpft und anhand von Vergleichen mit der realen Natur auf Konsistenz und Richtigkeit überprüft werden. Ist eine konsistente Beschreibung gefunden, können mit einem solchen Modell mögliche Reaktionen des Systems auf Umweltveränderungen wie die in 1.1 beschriebene Klimaveränderung untersucht werden. Außerdem ermöglicht es ein Modell, bedeutende Wissenslücken oder Mangel an Messdaten zu identifizieren, die eine genauere Beschreibung des Systems verhindern.

Ein dynamisches Modell zur Beschreibung eines rückgekoppelten System besteht aus Pools, die den Ort eines Stoffes oder einer Energiemenge darstellen, und Flüssen, die den Übergang von Materie oder Energie von einem in den anderen Pool beschreiben. Die Flüsse werden in Abhängigkeit von Poolgrößen des zu beschreibenden oder eines externen Systems beschrieben.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Teil des Systems der terrestrischen Biosphäre, nämlich dem Kohlenstoff-Gaswechsel als einem Teil des Kohlenstoffhaushalts der Vegetation.

1.4.1 Entwicklungsbedarf – Kriterien für ein gekoppeltes Modell

Verschiedene Kriterien sollten für ein Modell des gekoppelten terrestrischen Stickstoff- und Kohlenstoffkreislaufs erfüllt werden. Diese beziehen sich auf die berücksichtigten Interaktionen, den Grad an Detail der Darstellung und den Grad an Empirie.

Von primärer Bedeutung ist, dass die in Abschnitt 1.2.4 angesprochenen Interaktionen der Kreisläufe von C und N im Modell berücksichtigt sind. Besonders hervorgehoben seien hier nochmals die Bedeutung des Stickstoffs für die Akquisition von Ressourcen im allgemeinen. Auf der Ebene der Netto-Assimilation von Kohlenstoff ist der Stickstoffeinfluss sowohl bei der Photosynthese, als auch bei der Respiration zu berücksichtigen. Des Weiteren ist die Interaktion zwischen C und N bei den diversen Umsetzungen im Boden einzubinden. Auch die Emission gasförmiger N-Verbindungen, insbesondere N_2O (aufgrund seiner Klimawirksamkeit), sollte explizit modelliert werden. Außerdem muss die Fixierung von molekularem Stickstoff aus der Atmosphäre als wichtigster N-Zufluss in die terrestrische Biosphäre enthalten sein. Sie sollte möglichst dynamisch beschrieben werden.

Ein Modell sollte bezüglich der Produktivität neben der Limitierung der Photosynthese durch Energie oder CO_2 auch die Möglichkeit einer nicht ausreichenden Versorgung mit Assimilaten zur Strukturbildung beinhalten. Daher ist es notwendig in der modellierten Vegetation Pools des gespeicherten Kohlenstoffs einzuführen. Diese wiederum sollten die Respiration beeinflussen. Ein entsprechendes Respira-

tionsmodell muss also neben der Abhängigkeit von Stickstoff auch vom Kohlenhydratangebot reguliert werden.

Die einzelnen Prozesse sollten möglichst mechanistisch beschrieben werden, dies jedoch mit einer möglichst geringen Zahl an Einflussgrößen (treibenden Kräften). Dies betrifft speziell die Photosynthese und die Stomatabewegung, über die detaillierte physiologische Erkenntnisse vorliegen (Hoffstadt, 2000; Evans und Loreto, 2000). Die mechanistische Darstellung der Photosynthese und der Stomata erfordert die Modellierung eines expliziten CO₂-Gehalts in den Interzellularen des Blattes. Die mechanistische Darstellung der Stomatabewegung muss vor allem die Interaktion und gegenseitige Beeinflussung der die Stomataöffnungsweite bedingenden Faktoren Licht, Wasser und CO₂ beinhalten.

1.4.2 Global einheitliche Parametrisierung.

In der Natur zeigen nahezu alle Landpflanzen die gleichen grundlegenden Prozesse im Kohlenstoffhaushalt. Dazu zählen die Aufnahme von Kohlenstoff aus der Luft durch die Stomata und dessen Assimilation im Rahmen der Photosynthese. So entstandene Assimilate gehen durch die Allokation des nun organischen Kohlenstoffs in die Strukturphytomasse eines Organs über, werden gespeichert oder bei der Respiration zur Energiegewinnung veratmet.

Durch die gemeinsame grundlegende Physiologie sollte eine allgemeine Modellierung dieser Prozesse des C-Haushalts der Pflanze möglich sein. Konzepte der pflanzlichen Physiologie sollten global allgemein gültig sein. Daher sollten für verschiedene Vegetationstypen keine unterschiedlichen Modelle notwendig sein. Eine ausreichende Aufschlüsselung der Prozessbeschreibung sollte es ermöglichen, einen geeigneten Grad an Detaillierung der Beschreibung des Systems zu finden. Dann hängen die Parameter nicht mehr von der Pflanzenart oder vom Vegetationstyp ab sondern von den Umweltbedingungen, die dazu geführt haben, dass die Art bzw. der Vegetationstyp an einem bestimmten Ort vorkommt. Insbesondere die Wahl einer geeigneten Bezugsgröße kann hier von Bedeutung sein.

Die Parameter eines Modells beschreiben den Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und den modellierten Flüssen. In dieser Arbeit wird versucht, den Kohlenstoffgaswechsel der behandelten Vegetationstypen mit einem einheitlichen Satz von Parametern zu beschreiben. Eine global einheitliche Parametrisierung für alle Vegetationstypen kann auf der Ebene einer den natürlichen Mechanismen angenäherten Beschreibung erfolgen. Unterschiede zwischen verschiedenen Vegetationstypen sollten sich aus der Kombination von Einflussgrößen ergeben. Im Modell wird ein Grundprinzip beschrieben, das für alle Vegetationstypen gleichermaßen gilt.

Verschiedene Publikationen der letzten Jahre konnten zeigen, dass die Zusammenhänge zwischen Prozessen und den diese beeinflussenden Größen bei Betrachtung über eine möglichst hohe Zahl von Arten einheitlich sind:

Photosynthese. Reich et al. (1999) zeigen, dass die unter Feldbedingungen maximale Photosynthese deutlich mit der Stickstoffkonzentration, der spezifischen Blattfläche und der Lebensdauer des Blattes zusammenhängt. Dieser Zusammenhang unterscheidet sich kaum zwischen verschiedenen Vegetationstypen (Reich et al., 1992, 1999). Auch der modulierende Einfluss der spezifischen Blattfläche SLA ist in verschiedenen Vegetationstypen sehr ähnlich (Reich et al., 1998a).

Kattge (2002) untersuchte an verschiedenen Bäumen die Anfangssteigung der Abhängigkeit der Assimilation von der CO_2 -Konzentration im Blatt (Carboxylierungseffizienz, CE) und die maximale Photosyntheserate (A_{max}). Er fand für A_{max} einen linearen Zusammenhang mit der Stickstoffkonzentration und für CE einen linearen Zusammenhang mit Tendenz zur Sättigung.

Einschränkend muss vermerkt werden, dass eine andere Studie jedoch Unterschiede im Verhältnis der Stickstoffkonzentration und der maximalen Photosynthese zwischen immergrünen und laubabwerfenden Bäumen fand (Reich et al., 1995). In jener Studie wurde jedoch eine deutlich geringere Anzahl Arten untersucht.

Bezüglich der Strahlungsabsorption konnte gezeigt werden, dass sich Laubbäume und Gräser auf Blattebene statistisch ähnlich sind (Asner et al., 1998).

Respiration. Für die Respiration von Blättern wurde ein viele Vegetationstypen übergreifender Zusammenhang mit dem Stickstoffgehalt gezeigt (Reich et al., 1998b, 2006). Ein recht starker modulierender Einfluss der spezifischen Blattfläche auf den Stickstoff-Respirations-Zusammenhang wurde nur von Reich et al. (1998b) gefunden. Wurden die Messungen nach Wuchsformen gruppiert, so zeigten diese keinen einheitlichen Zusammenhang.

Wright et al. (2006) zeigen, dass auch die klimatischen Bedingungen am Wuchsort den Zusammenhang zwischen Respiration und Stickstoff insofern verändern können, als dass mit steigender Strahlung und steigendem Niederschlag die Respiration bei gleichem Stickstoffgehalt steigt. Auch Bolstad et al. (1999) fanden Stickstoff-Respirations-Zusammenhänge, die mit abnehmender Höhe über dem Meer höhere Respiration in Bezug auf Stickstoff zeigten.

Hier ist jedoch zu beachten, dass ein möglicher Einfluss des Kohlenhydratgehaltes und die Akklimatisierung an die Temperaturen am Wuchsort in keiner der Studien berücksichtigt wurden. Dies könnte zu Unterschieden in den Daten geführt haben, die auf indirekte Effekte und nicht auf den Prozess Respiration selber zurückzuführen sind.

Die Möglichkeit einer einheitlichen Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Respiration für verschiedene Vegetationstypen konnte von Tjoelker et al. (2001) gezeigt werden.

1.4.3 Modelle des globalen C- und N-Kreislaufes

Es hat bereits umfangreiche Anstrengungen gegeben, Modelle des Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts der terrestrischen Biosphäre zu erstellen. Sie unterscheiden sich in Umfang, Detailtiefe und Komplexität, in der zeitlichen und räumlichen Auflösung sowie in der Art der Beschreibung der Zusammenhänge. Im Folgenden werden kurz einige Modelle vorgestellt, wobei auch auf die Schwächen im Hinblick auf die oben dargestellten Kriterien (Abschnitt 1.4.1) eingegangen wird. Eine ausführlichere Vorstellung der Modelle ist im Anhang B gegeben.

1.4.3.1 CENTURY

CENTURY (Parton et al., 1987, 1993; Metherell et al., 1993) ist eines der ältesten Modelle, das auf große Flächen anwendbar ist und zusätzlich zum Kohlenstoff- auch Nährstoffkreisläufe beinhaltet. Es wurde ursprünglich für Grünland und landwirtschaftliche Flächen entwickelt, später aber um Module zur Simulation von Wäldern

erweitert. Durch Kombination beider Module können auch Savannen behandelt werden. Dort konkurrieren dann Gräser und Bäume um Wasser, Licht und Nährstoffe. CENTURY beschreibt die Dynamik von Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor. Es arbeitet auf einem $0,5^\circ$ -Gitter (geographische Länge und Breite) mit monatlichen Zeitschritten.

Schwächen. CENTURY beinhaltet keine separate Beschreibung von Photosynthese und Respiration. Eine Abhängigkeit der Produktivität von der Strahlung ist nicht realisiert. Außerdem ist die Produktivität nur über einen empirischen Ansatz von der atmosphärischen CO_2 -Konzentration abhängig. Mit Bodentiefe und insbesondere Boden-pH benötigt CENTURY Antriebsdaten, die global nur mit großen Unsicherheiten behaftet vorliegen.

1.4.3.2 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)

CASA (Potter et al., 1993; Thompson et al., 1996; Potter und Klooster, 1998) ist ein in verschiedenen Versionen (reine Stoffkreisläufe oder dynamisches Vegetationsmodell) existierendes Modell, das sowohl global als auch regional laufen kann. Zentral bei CASA ist das Prinzip, festgesetzte ortsunabhängige metabolische Konstanten durch von Außenbedingungen wie Wetter abhängige Faktoren zu skalieren. CASA unterscheidet weltweit 21 Vegetationsklassen, die auch landwirtschaftlich genutzte Flächen und Eisflächen beinhalten. Das Modell läuft auf einem Gitter von $0,5^\circ$ oder 1° Kantlänge und, abhängig von der Modellversion, in täglichen oder monatlichen Zeitschritten.

Schwächen. CASA wird von Fernerkundungsdaten (NDVI) angetrieben und hat dadurch seinen Schwerpunkt bei analytischen Anwendungen. Wie CENTURY beinhaltet auch CASA keine Unterscheidung von Photosynthese und Respiration und somit keine mechanistische Beschreibung der Produktivität. Ein CO_2 -Einfluss auf die Produktivität ist nicht berücksichtigt. Dieser wird als im NDVI enthalten angenommen. Außerdem ist die Interaktion zwischen C- und N-Kreislauf in CASA nicht vollständig, da weder C- noch N-Angebot direkten Einfluss auf die Produktivität haben. CASA enthält (basierend auf der vorliegenden Literatur) keine Routine zur Fixierung von molekularem Stickstoff.

1.4.3.3 HYBRID

HYBRID (Friend et al., 1997) wurde zur Integration in ein gekoppeltes Erdsystemmodell entwickelt. Es ist ein dynamisches Vegetationsmodell, bei dem demnach die Vegetation nicht anhand einer Karte festgelegt ist, sondern sich aufgrund der Bedingungen am jeweiligen Ort ergibt. HYBRID arbeitet global auf einem $0,5^\circ$ -Gitter mit Zeitschritten von einem Tag oder einem Jahr, abhängig vom jeweiligen Prozess.

HYBRID simuliert Plots mit einzelnen Bäumen (6 verschiedene Typen) und einer Grasschicht (unterschieden nach C_3 und C_4 Gräsern). Die Individuen starten als Keimlinge und wachsen in Konkurrenz zueinander. In jedem Gitterelement werden zehn unabhängige Plots simuliert. Es werden vollständige Massenbilanzen für C, N und Wasser und die Energiebilanz gerechnet.

Schwächen. HYBRID simuliert explizit Photosynthese und Respiration. Dabei sind beide jedoch nicht unabhängig voneinander. Die Respiration wird bei Licht in Abhängigkeit von der maximalen Carboxylierungsleistung der Photosynthese bestimmt. Eine Abhängigkeit der nächtlichen Respiration vom Substratangebot existiert nicht, da auch kein Kohlenhydratpool integriert ist. Die Stomata werden über ein weitestgehend empirisches Modell simuliert. Da Individuen explizit modelliert werden, müssen für die zu untersuchenden Vegetationstypen die entsprechenden allometrischen Daten bekannt sein. Die Fixierung molekularen Stickstoffs aus der Atmosphäre ist als konstant angenommen. Es gibt keine Routine zur expliziten Simulation der Emission gasförmiger Stickstoffverbindungen.

1.4.3.4 BIOME-BGC

BIOME-BGC basiert auf dem FOREST-BGC Modell (Running und Coughlan, 1988; Running und Hunt, 1993; Thornton et al., 2005), wurde jedoch um die Möglichkeit, auch andere als Waldbiome zu simulieren, erweitert und enthält detailliertere Prozessbeschreibungen. Es kann auf verschiedenen Gittern betrieben werden und läuft mit einem Zeitschritt von einem Tag.

Schwächen. BIOME-BGC koppelt in seinem Photosynthesemodell die Elektronentransportkapazität an die maximale Carboxylierungsrate der Rubisco, was Unterschiede in der Temperaturabhängigkeit beider Vorgänge außer acht lässt. Das Modell der Respiration der Vegetation beinhaltet keinen Einfluss von Stickstoff oder dem Kohlenhydratangebot. Die Fixierung von Luftstickstoff muss vorgegeben werden.

1.4.3.5 Terrestrial Ecosystem Model (TEM)

TEM (McGuire et al., 1997; Tian et al., 1999) ist ein Modell zur Simulation des terrestrischen Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts. TEM wird auf einem globalen $0,5^\circ$ -Gitter betrieben und läuft in monatlichen Zeitschritten. Im VEMAP Projekt (VEMAP Members, 1995) wurde das Modell mit 21 verschiedenen Vegetationstypen betrieben.

Schwächen. In TEM wird die Produktivität als Differenz von GPP und Respiration berechnet. Die GPP wird jedoch mit einem empirischen Modell bestimmt. Eine maximale Assimilationsrate ist vorgegeben, die nur herunterreguliert werden kann. Die Stomataleitfähigkeit, die den Einfluss von CO_2 auf die Assimilation direkt vermittelt, ist nur über die Evapotranspiration reguliert; CO_2 und Strahlung haben keinen Einfluss. Die Respiration zur Erhaltung der Phytomasse ist nur Funktion der Phytomasse; Stickstoff und Kohlenhydratvorrat haben keinen Einfluss. Die Respiration zur Erzeugung neuer Strukturphytomasse (Wachstumsatmung) ist direkt an GPP und Erhaltungsatmung geknüpft. Deposition und N_2 -Fixierung werden nicht unterschieden. Sie müssen dem Modell als Summe übergeben werden. Auch die N-Verluste durch Auswaschung und Abgabe gasförmiger N-Verbindungen werden nicht unterschieden.

1.4.3.6 Nitrogen Carbon Interaction Model (NCIM)

Der Kohlenstoffkreislauf in NCIM (Esser, 2007) basiert auf dem High Resolution Biosphere Model (HRBM Esser et al., 1994). Diesem ist ein Stickstoffkreislauf angegliedert, durch den die Kohlenstoffflüsse beeinflusst werden. Ein vereinfachter graphischer Überblick über die Flüsse und Pools des Modells findet sich in Kapitel 6.5 bei Heimann et al. (1999). NCIM berücksichtigt 176 Biome nach der Vegetationskarte von Schmithüsen (1976).

Schwächen. In NCIM wird die Produktivität mittels eines empirischen Modells bestimmt. Photosynthese und Respiration sind nicht simuliert. Die Emissionen gasförmiger N-Verbindungen aus dem Boden werden als Summe von N_2O und N_2 modelliert.

1.4.3.7 Fazit

Keines der vorgestellten Modelle hat unabhängige mechanistische Beschreibungen von Photosynthese und Respiration. Außerdem ist nirgends eine mechanistische Beschreibung der Stomatareaktion auf Licht, CO_2 und Bodenwasser integriert.

Hier besteht Entwicklungsbedarf für ein neues Modell, das die bestehenden Beschreibungen der Produktivität durch unabhängige und mechanistische die Nährstoffsituation berücksichtigende Beschreibungen von Photosynthese und Respiration ersetzt und dies mit einer mechanistischen Beschreibung der stomatären Leitfähigkeit verknüpft.

1.5 Ziel und Fragestellung

Hauptziel dieser Arbeit ist es, das Modell CABIN (CArbon Balance Influenced by Nitrogen) zu entwickeln, das es ermöglicht, den in Abschnitt 1.4.1 beschriebenen Kriterien gerecht zu werden. Zweck von CABIN wird es sein, durch die Simulation der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels die Produktivität der Vegetation abzuschätzen.

Angelehnt an bestehende Modelle werden zusätzliche oder besser den aufgestellten Kriterien genügende Teilmodelle zur Beschreibung von Prozessen des Kohlenstoffhaushalts entwickelt. Die zentralen Prozesse sind hier die Photosynthese, die pflanzliche Respiration sowie die Speicherung und Allokation von Kohlenstoff. Diese Prozesse werden in separaten Teilmodellen möglichst mechanistisch beschrieben. Dabei wird versucht, Formulierungen für die Prozesse zu finden, die eine global einheitliche Parametrisierung (siehe Abschnitte 1.4.2) möglich machen.

Neben der Entwicklung und Parametrisierung schließt diese Arbeit die Prüfung der Teilmodelle und des gesamten Modells CABIN ein. Diese Prüfung erfolgt anhand von Vergleichen mit Messdaten.

Dabei wird die Bedeutung einiger Parameter von CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels analysiert. Zu diesem Zweck werden Werte von Parametern von CABIN variiert und der Einfluss auf die modellierte NPP und auf die Abweichung zwischen Modell und Messung sowie die Sensitivität von CABIN gegenüber der Variierung untersucht. Dabei wird versucht, Abweichungen von den Messdaten auf die Parameter zurückzuführen.

Kapitel 2

Übernommene Modelle

In dieser Arbeit werden Elemente aus Modellen anderer Autoren verwendet. Sofern es sich nicht nur um einzelne Gleichungen handelt, werden diese in diesem Kapitel kurz vorgestellt. Hierbei wird auch auf Änderungen oder Erweiterungen gegenüber den Originalpublikationen eingegangen, sofern auch diese auf Arbeiten anderer Autoren beruhen. Eigenentwicklungen sind in Kapitel 3 (Materialien und Methoden) dargestellt, um diese von übernommenen Elementen abzugrenzen.

2.1 Das Modell des globalen C- und N-Kreislaufs

Struktur und Funktionsweise von CABIN wurden angelehnt an die Struktur eines als Basismodell verwendeten Modells des globalen C- und N-Kreislaufs entwickelt.

Wie in Abschnitt 1.4.3 dargestellt, erfüllen die bereits existierenden Modelle des globalen gekoppelten C- und N-Kreislaufs einen großen Teil der in Abschnitt 1.4.1 formulierten Anforderungen. Für diese Arbeit wurde NCIM als Basismodell gewählt, da es gegenüber den anderen Modellen (Abschnitt 1.4.3) einige Vorteile hat: NCIM unterscheidet mehr Vegetationstypen als CENTURY, benötigt keine Fernerkundungsdaten wie CASA und keine allometrischen Angaben über Baumarten wie HYBRID. Des Weiteren hat es eine feiner aufgelöste Poolstruktur als TEM.

Die NPP wird in NCIM bisher durch ein dort integriertes abgewandeltes MIAMI Modell (Lieth, 1975) berechnet. Dieses ist durch CABIN zu ersetzen.

NCIM wird in den Abschnitten 1.4.3.6 und B.6 vorgestellt.

2.2 Das Modell der stomatären Leitfähigkeit

Als Stomatamodell werden Teile des Giessen Global Generic Water Conductance Model (GIWACOM, Esser und Hoffstadt, 2000) verwendet. Es ist das einzige vorliegende mechanistische Modell der Stomataleitfähigkeit, das die interagierenden Einflüsse von CO₂, Licht und Bodenwasser berücksichtigt und global parametrisiert ist.

GIWACOM läuft auf dem gleichen 0,5°-Gitter, wie auch NCIM. Es stellt die Spaltöffnungsapparate in Form von Schließ- und Nebenzellen dar. In Abhängigkeit von den treibenden Kräften CO₂ im Blatt, Strahlung und Bodenwasserpotential werden Ionen zwischen den beiden Zelltypen bewegt. Wasser wird anhand der sich einstellenden Wasserpotentiale zwischen den Zellen bewegt. Aus der Wasserbilanz

der Zellen wird dann der Turgor berechnet, der die Stomataöffnungsweite und damit die Leitfähigkeit bestimmt.

GIWACOM verwendet in der dokumentierten Version (Esser und Hoffstadt, 2000) ein vereinfachtes, dem Modell von Farquhar et al. (1980) ähnliches, Modell der Photosynthese zusammen mit einem einfachen Modell der Respiration, um die interzelluläre CO₂-Konzentration zu bestimmen. Diese Teilmodelle von GIWACOM werden durch CABIN ersetzt.

Da GIWACOM die Einflüsse der Regelgrößen mechanistisch auf Ebene des Ionen- und Wasserhaushalts der Schließ- und Nebenzellen beschreibt, benötigt es einen sehr kurzen Zeitschritt von einer hundertstel Sekunde. Durch Einführung von steady state Formulierungen für die Einstellung der interzellulären CO₂-Konzentration wird ein Zeitschritt von einer Drittelsekunde möglich.

Als treibenden Kräfte werden Daten über Temperatur, Bodenwasser und die Transpiration benötigt. Über die interzelluläre CO₂-Konzentration nehmen indirekt auch die treibenden Kräfte der Teilmodelle des Kohlenstoffgaswechsels Einfluss.

2.2.1 Das Bodenwassermodell

Gegenüber der dokumentierten Version von GIWACOM (Esser und Hoffstadt, 2000) wird in dieser Arbeit eine abgewandelte Formulierung zur Berechnung des Bodenwasserpotentials eingesetzt.

In GIWACOM wird für die Berechnung der stomatären Leitfähigkeit das Bodenwasserpotential benötigt. Für die Orte, für die CABIN in dieser Arbeit angewendet werden soll, liegen darüber keine geeigneten Messdaten vor. Das Bodenwasserpotential wird daher nach einem neuen Ansatz von Esser und Seekatz (Seekatz, 2006) berechnet. Diese ursprünglich für treibende Kräfte in monatlicher Auflösung erstellte Routine wurde für diese Arbeit mit stündliche Eingabedaten betrieben. Der Ansatz von Esser und Seekatz wird im Folgenden beschrieben:

Zur Unterscheidung zwischen feuchten und trockenen Bedingungen wird in Anlehnung an die Klimadiagramme nach Walter und Lieth (Walter und Lieth, 1960) das Verhältnis von Niederschlägen und Temperaturen verwendet. Zu diesem Zweck wird ein Wert definiert, der hier Feuchteindex (FI) genannt werden soll:

$$FI = \frac{P}{20} - \frac{T}{10} \quad (2.1)$$

Hier ist P der aktuelle Niederschlag (mm h⁻¹) und T die mittlere Temperatur (°C) über den selben Zeitraum. Die Werte von FI werden auf den Bereich von -2 bis $+5$ beschränkt. Die Auswirkung der Verhältnisse in der Vergangenheit wird durch Verwendung einer Art laufenden Mittels \overline{FI} mit einer Zeitspanne von einem halben Monat (hier als 21 600 Minuten dargestellt) berücksichtigt, das zu jeder Modellminute m aktualisiert wird:

$$\overline{FI}(m) = \frac{21\,599}{21\,600} \cdot \overline{FI} \cdot (m - 1) + \frac{1}{21\,600} \cdot FI \quad (2.2)$$

Mit einer empirischen Funktion wird ein Bodenwasserpotential Ψ_r (MPa) aus \overline{FI} abgeleitet:

$$\Psi_r = 1,38 \cdot (1 - e^{(-0,636\overline{FI})}) - 1,38 \quad (2.3)$$

Der relative Bodenwassergehalt, der in GIWACOM für die Berechnung der Wasserbilanzen und damit letztendlich für die Berechnung der Stomataleitfähigkeit benötigt

wird, wird aus Ψ_r mittels einer von der Textur des Bodens abhängigen Funktion hergeleitet.

In Anhang D befindet sich für jeden Ort, für den CABIN angewandt wurde, eine Grafik mit dem Vergleich der auf monatlicher und auf minütlicher Zeitbasis bestimmten Bodenwasserpotentiale.

2.3 Das Modell der Photosynthese von Kull und Kruijt

Für die stickstoffabhängige Beschreibung der Photosynthese wurde für CABIN das Modell von Kull und Kruijt (1998) adaptiert. Es basiert auf dem Ansatz von Farquhar et al. (1980), in dem die Photosynthese entweder durch die Carboxylierungsleistung der Rubisco bei gegebener interzellulärer CO_2 -Konzentration oder durch den Elektronentransport bei gegebener absorbiertener Strahlung limitiert wird. Kull und Kruijt (1998) erweitern dieses Modell um einen Stickstoffbezug, der es ermöglicht, die räumliche Heterogenität der Photosynthese einzubeziehen.

Dieses Modell wird für diese Arbeit auf einen ganzen Pflanzenbestand angewendet, wobei die Blattmasse dynamisch in Abhängigkeit von Licht, CO_2 und Stickstoff in zwei Schichten geteilt wird: eine lichtgesättigte und eine lichtlimitierte. Beide Schichten werden jeweils wie ein großes Blatt behandelt (erweitertes big leaf Modell).

Es wird in Kauf genommen, dass bei einem big leaf Modell implizit in jeder Schicht eine zur absorbierten Strahlung proportionale Verteilung des Stickstoffs angenommen wird, was in realen Beständen nicht generell der Fall ist (Kull und Kruijt, 1998; Friend, 2001). Das Photosynthesemodell verhält sich jedoch nicht wie ein klassisches big leaf Modell, da sich durch die dynamischen Schichten bei einer Veränderung der Einstrahlung die Photosynthese an unterschiedlichen Stellen im Bestand um unterschiedliche relative Werte ändert.

Das Modell wurde vom Blattflächenbezug der Originalpublikation (Kull und Kruijt, 1998) auf Massenbezug umgeschrieben.

2.3.1 Modellbeschreibung

Bezüglich der Photosynthese unterscheidet das Photosynthesemodell von Kull und Kruijt primär zwischen einer lichtgesättigten (oben) und einer lichtlimitierten Schicht (darunter) im Bestand. Lichtgesättigt ist im oberen Teil des Bestandes der Elektronentransport. Ob die Photosynthese dort durch CO_2 oder durch die Energie limitiert wird, hängt von der herrschenden CO_2 -Konzentration ab. In beiden Fällen kann eine Erhöhung der Strahlung die Assimilation in dieser Schicht nicht weiter steigern.

Lichtgesättigte Photosynthese. Die lichtgesättigte durch die Elektronentransportkapazität limitierte Photosynthese A_j ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$) berechnet sich nach:

$$A_j = \frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*} \quad (2.4)$$

wobei c_i die interzelluläre CO_2 -Konzentration ($\mu\text{l l}^{-1}$), Γ_* den Photokompensationspunkt (Wert von c_i , bei dem sich photosynthetische C-Assimilation und photorespiatorische Decarboxylierung gleichen, Einheit $\mu\text{l l}^{-1}$) und a die Anzahl Elektronen,

Tabelle 2.1: Werte für die Parameter Berechnung von J_{max} und V_{cmax} aus der Stickstoffkonzentration im Blatt (siehe Gleichungen 2.6 und 2.7).

	o ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	m ($\mu\text{molC mgN}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
J_{max}	$o_j = -0,72$	$m_j = 0,1$
V_{cmax}	$o_v = -0,36$	$m_v = 0,05$

die zum Fixieren eines Moleküls CO_2 durch die Elektronentransportkette transportiert werden müssen ($\mu\text{mol e}^\ominus \mu\text{molC}^{-1}$), beschreibt. Für a wird ein Wert von 4 angenommen (Farquhar et al., 1980; Kull und Kruijt, 1998). J_{max} ist die maximale Elektronentransportrate ($\mu\text{mol e}^\ominus \text{gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

Ist c_i zu gering, um die durch die Primärreaktion (Lichtreaktion) bereitgestellte Energie und die Reduktionsäquivalente vollständig zu nutzen (CO_2 -Limitierung), kann auch noch Lichtsättigung erreicht werden, wenn die absorbierte Energie nicht zum Erreichen der maximalen Elektronentransportleistung ausreicht. Die lichtgesättigte CO_2 -limitierte Photosynthese A_v ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$) wird wie folgt berechnet:

$$A_v = V_{cmax} \cdot \frac{c_i}{c_i + k_c \left(1 + \frac{o_i}{k_o}\right)} \quad (2.5)$$

wobei k_c und k_o die kinetischen Konstanten der Rubisco für die Carboxylierung und Oxygenierung ($\mu\text{l l}^{-1}$) und o_i die Sauerstoffkonzentration in den Interzellularen ($\mu\text{l l}^{-1}$) darstellen. V_{cmax} ist die maximale Carboxylierungsrate der Rubisco ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

k_c wird hier um den Einfluss von o_i auf das Verhältnis der Anzahl stattfindender Carboxylierungs- zu Oxygenierungsreaktionen der Rubisco korrigiert.

Dem Prinzip des Modells von Farquhar et al. (1980) folgend wird sowohl A_j als auch A_v berechnet. Die tatsächlich in der lichtgesättigten Schicht stattfindende Photosynthese wird durch den geringeren Wert von beiden beschrieben (siehe Gleichung 2.10).

Die Stickstoffabhängigkeit von J_{max} und V_{cmax} wird mit linearen Funktionen beschrieben:

$$J_{max} = o_j + m_j \cdot N_{DW} \quad (2.6)$$

$$V_{cmax} = o_v + m_v \cdot N_{DW} \quad (2.7)$$

N_{DW} steht hier für die Stickstoffkonzentration bezogen auf das Trockengewicht (mgN gDW^{-1}). Letzteres wird aus der C-Phytomasse unter Annahme von 45 % Kohlenstoff im Trockengewicht hergeleitet. Die Werte für die Parameter o_j , o_v , m_j und m_v basieren auf einer noch unveröffentlichten Zusammenstellung von Daten zur Photosynthese von C_3 -Pflanzen (Kattge, persönliche Mitteilung) und sind in Tabelle 2.1 angegeben.

Unterscheidung zwischen lichtgesättigter und -limitierter Schicht. Die Schichtung des Bestandes wird im Photosynthesemodell von Kull und Kruijt (1998) nicht räumlich explizit vorgenommen. Stattdessen werden die Schichten anhand der in ihnen vorhandenen Menge Stickstoff festgelegt.

Es wird angenommen, dass die Strahlung nur von Chlorophyll absorbiert wird und dass das Verhältnis von Chlorophyll zu Stickstoff im gesamten Bestand konstant ist. Auf dieser Basis kann für eine bestimmte Menge Stickstoff bestimmt werden, wieviel Strahlung sie absorbiert. Dazu wird die absorbierte Strahlung I_a ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in Abhängigkeit von der durchstrahlten Menge Stickstoff berechnet:

$$I_a = I_0(1 - r)(1 - e^{-k_a \cdot k_{Chl,N} \cdot N_{ha} \frac{1}{LAI}}) \quad (2.8)$$

r bezeichnet hier die (einheitenlose) Reflektivität des Blattes, k_a ($\text{m}_{leaf}^2 \mu\text{molChl}^{-1}$) ist der Absorptionskoeffizient an Chlorophyll, $k_{Chl,N}$ ($\mu\text{molChl gN}^{-1}$) bezeichnet die Menge Chlorophyll pro Stickstoff und I_0 ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ist die Einstrahlung an der Oberfläche des Bestandes. N_{ha} steht für die Menge Blattstickstoff bezogen auf die Grundfläche (gN m^{-2}). Diese Menge wird mittels des Blattflächenindex LAI ($\text{m}_{leaf}^2 \text{m}^{-2}$, siehe Abschnitt G.2.6) auf Blattflächenbezug umgerechnet.

Nach Kull und Kruijt (1998) wird r zur Vereinfachung auf null und k_a auf $0,0055 \text{m}_{leaf}^2 \mu\text{molChl}^{-1}$ gesetzt. Evans (1989) geben Werte für $k_{Chl,N}$ an. Der Median der dort angegebenen Spanne, nämlich $406,9 \mu\text{molChl gN}^{-1}$ wird in dieser Arbeit eingesetzt.

Die Menge Stickstoff, die die lichtgesättigte Schicht bildet ist nun diejenige, in der lichtgesättigte Photosynthese stattfindet. In ihr wird soviel Strahlung absorbiert, dass die restliche Strahlung nicht ausreicht, um noch Lichtsättigung zu erreichen. In der lichtungesättigten Schicht, die von der restlichen Menge Stickstoff gebildet wird, herrscht also lichtlimitierte Photosynthese. Dies ist unabhängig davon, ob in der lichtgesättigten Schicht das CO_2 -Angebot, oder die Elektronentransportkapazität limitierend auf die Photosynthese wirkt.

Lichtlimitierte Photosynthese. Die lichtlimitierte Photosynthese A_h ($\mu\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$) wird auf Basis der absorbierten Strahlung I_a berechnet:

$$A_h = I_a \cdot \alpha \cdot \frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*} \quad (2.9)$$

Hier bezeichnet α die pro Mol Lichtquanten fixierten Mol Kohlenstoff ($\mu\text{molC } \mu\text{E}^{-1}$). Der Wert für α wird nach Kull und Kruijt (1998) auf 0,08 gesetzt.

Berechnung der Bestandesphotosynthese. Es ist nun zu berechnen, wie sich der Blattstickstoff auf die lichtgesättigte und -limitierte Schicht verteilt. Stellt man sich vor, dass der Stickstoff ausgehend von der Bestandesoberfläche nach und nach „durchstrahlt“ wird und die verbleibende Strahlung sich aufgrund der Absorption immer weiter verringert, so ergibt sich eine Menge „durchstrahlten“ Stickstoffs, bei der die Strahlung nicht mehr ausreicht, um eine lichtgesättigte Photosynthese zu ermöglichen. Im Photosynthesemodell von Kull und Kruijt (1998) wird angenommen, dass die Menge Stickstoff, bei der dies der Fall ist, die Menge ist, bei der sich lichtlimitierte und lichtgesättigte Photosynthese gleichen. Um dies berechnen zu können, müssen die lichtlimitierte und -gesättigte Photosynthese auf Stickstoff bezogen werden. Dies ergibt für die lichtgesättigte Photosynthese A_{sat} ($\mu\text{molC gN}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$$A_{sat} = \frac{\min(A_j, A_v)}{N_{DW}} \quad (2.10)$$

wobei implizit angenommen wird, dass der Blattstickstoff homogen in der lichtgesättigten Schicht verteilt ist. Die Gleichung gilt überall im Bestand.

Anders verhält es sich mit der Gleichung für die lichtlimitierte Photosynthese. Gleichung 2.9 beschreibt die durch Strahlungsabsorption am „durchstrahlten“ Stickstoff seit Eintritt der Strahlung in den Bestand mögliche lichtlimitierte Photosynthese unabhängig von anderen Limitierungen. Gleichung 2.10 gilt jedoch für jede beliebige Menge an „durchstrahltem“ Stickstoff gleichermaßen und kann als Photosynthese an einem Punkt im Bestand aufgefasst werden. Um A_h und A_{sat} vergleichen zu können, muss auch A_h für eine Punkt im Bestand bestimmt werden. Dies wird möglich, wenn man A_h nach Stickstoff ableitet:

$$\frac{dA_h}{dN} = (1 - r) \cdot \frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*} \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot e^{(-k_a \cdot k_{Chl,N} \cdot N_{ha} \cdot \frac{1}{LAI})} \cdot k_a \cdot k_{Chl,N} \cdot \frac{1}{LAI} \quad (2.11)$$

Für $\frac{dA_h}{dN}$ ergibt sich $\mu\text{molC gN}^{-1} \text{ s}^{-1}$ als Einheit^a. Um nun die von der einfallenden Strahlung durchdrungene Menge Stickstoff zu finden, bei der der Limitierungsübergang stattfindet, werden lichtgesättigte und -limitierte Photosynthese gleichgesetzt.

$$\frac{dA_h}{dN} = A_{sat} \quad (2.12)$$

und nach der nun N_{lim} (gN m^{-2}) genannten Stickstoffmenge aufgelöst:

$$N_{lim} = -\ln\left(\frac{A_{sat}}{(1 - r) \cdot \frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*} \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot k_a \cdot k_{Chl,N} \cdot \frac{1}{LAI}}\right) \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \quad (2.13)$$

Durch Vergleich von N_{lim} mit dem vorhandenen Blattstickstoff N_{ha} kann nun die Situation im Bestand beurteilt werden. Es wird dabei die Menge Stickstoff N_{sat} (gN m^{-2}) festgelegt, die in der lichtgesättigten Schicht des Bestandes vorliegt. Drei Situationen sind möglich:

1. $N_{lim} < 0$: es tritt keine Lichtsättigung auf: $N_{sat} = 0$
2. $0 < N_{lim} \leq N_{ha}$: im oberen Teil des Bestandes herrscht Lichtsättigung, darunter Lichtlimitierung: $N_{sat} = N_{lim}$
3. $N_{lim} > N_{ha}$: ganzer Bestand lichtgesättigt: $N_{sat} = N_{ha}$

Die Bestandesphotosynthese A_{ph} ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$) berechnet sich nun aus der Summe der Photosynthese in der lichtgesättigten (von null bis N_{sat} , falls existent) und der lichtlimitierten Schicht (von N_{sat} bis N_{ha}):

$$A_{ph} = \left(1 - \frac{\Gamma_*}{c_i}\right) \left(\int_0^{N_{sat}} N \cdot A_{sat} dN + \int_{N_{sat}}^{N_{ha}} A_h dN\right) \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \quad (2.14)$$

Der erste Term rechnet die CO_2 -freisetzende Wirkung der Photorespiration mit ein (Farquhar et al., 1980). Der letzte Term sorgt für die Umrechnung auf Trockenmassenbezug. Hier steht C_{ha} (gC m^{-2}) für die oberirdische krautige Kohlenstoff-Phytomasse. Für die Umrechnung auf Trockenmasse wird ein Gehalt von 45 % Kohlenstoff in der Trockenmasse angenommen.

^aDie Terme $(1 - r)$ und $\frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*}$ sowie die Exponentialfunktion sind einheitenlos. Des Weiteren gilt $[I_0] = \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $[\alpha] = \mu\text{molC } \mu\text{E}^{-1}$, $[k_a] = \text{m}_{leaf}^2 \mu\text{molChl}^{-1}$, $[k_{Chl,N}] = \mu\text{molChl gN}^{-1}$ und $[LAI] = \text{m}_{leaf}^2 \text{ m}^{-2}$. Nach Kürzung von μE , m^2 , m_{leaf}^2 und μmolChl ergibt sich die angegebene Einheit.

Tabelle 2.2: Liste der Arrhenius-Parameter für die Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Rubiscopeparameter (nach Medlyn et al., 2002; basierend auf Bernacchi et al., 2001) nach Gleichung 2.16. Symbole: P_{Ref} – Parameterwert bei Referenztemperatur; E_a – Aktivierungsenergie; k_c – Michaelis-Menten-Koeffizient der Carboxylierungsreaktion der Rubisco; k_o – Michaelis-Menten-Koeffizient der Oxygenierungsreaktion der Rubisco; Γ_* – Photokompensationspunkt.

Parameter	P_{Ref} ($\mu\text{l l}^{-1}$)	E_a (kJ mol^{-1})
k_c	404,9	79,43
k_o	278,4	36,38
Γ_*	42,75	37,83

Unter der Annahme, dass der Chlorophyll-Stickstoff Zusammenhang im ganzen Bestand gleich ist, ergibt sich folgende analytische Lösung für A_{ph} :

$$A_{ph} = \left(1 - \frac{\Gamma_*}{c_i}\right) \left(A_{sat} \cdot N_{sat} + \alpha \cdot \frac{c_i}{c_i + 2\Gamma_*} \cdot (1 - r) \cdot I_0 \right. \\ \left. \cdot \left(e^{-k_a \cdot k_{chl,N} \cdot N_{sat} \cdot \frac{1}{LAI}} - e^{-k_a \cdot k_{chl,N} \cdot N_{ha} \cdot \frac{1}{LAI}} \right) \right) \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \quad (2.15)$$

Mit dieser Beschreibung sind die Einflüsse von CO_2 , Stickstoff und Strahlung auf die Photosynthese berücksichtigt.

2.3.2 Temperaturabhängigkeit der Photosynthese

Die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese wird für die kinetischen Parameter der Rubisco (k_c , k_o und Γ_*) nach Medlyn et al. (2002) mit Arrhenius-Funktionen der allgemeinen Form

$$P(T) = P_{Ref} \cdot \exp\left(\frac{E_a \cdot (T - T_{Ref})}{T_{Ref} \cdot \mathcal{R} \cdot T}\right) \quad (2.16)$$

beschrieben, wobei $P(T)$ den temperaturabhängigen Parameter bei der Temperatur T (K) und P_{Ref} den selben Parameter bei Referenztemperatur T_{Ref} (K) darstellt. E_a beschreibt die Aktivierungsenergie der jeweiligen Reaktion (kJ mol^{-1}) und \mathcal{R} ($\text{kJ K}^{-1} \text{mol}^{-1}$) die allgemeine Gaskonstante. Abweichend von Medlyn et al. (2002) werden die Parameter hier nicht auf eine konstante Temperatur von 25°C bezogen, sondern der am jeweiligen Standort herrschenden Referenztemperatur zugeordnet. Die verwendeten Werte für die Parameter finden sich in Tabelle 2.2.

Für die Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von V_{cmax} und J_{max} wird nach Medlyn et al. (2002) eine Optimumsfunktion eingesetzt:

$$P(T) = P_{Ref} \exp\left(\frac{H_a \cdot (T - T_{Ref})}{T_{Ref} \cdot \mathcal{R} \cdot T}\right) \frac{1 + \exp\left(\frac{T_{Ref} \cdot \Delta S - H_d}{T_{Ref} \cdot \mathcal{R}}\right)}{1 + \exp\left(\frac{T \cdot \Delta S - H_d}{T \cdot \mathcal{R}}\right)} \quad (2.17)$$

H_a beschreibt die exponentielle Steigung der Funktion während die exponentielle Abnahme durch H_d beschrieben wird (beide in kJ mol^{-1}). Die für H_a und H_d verwendeten Werte wurden aus von Medlyn et al. (2002) angegebenen Messwerten

Tabelle 2.3: Liste der Parameter zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von V_{cmax} und J_{max} nach Gleichung 2.17 und zur Beschreibung des Entropiefaktors nach Gleichung 2.18 (Medlyn et al., 2002). Symbole: H_a – Steigungsparameter; H_d – Abnahmeparameter; V_{cmax} – maximale Carboxylierungsrate der Rubisco; J_{max} – maximale Transportleistung der Elektronentransportkette.

Parameter	H_a (kJ mol ⁻¹)	H_d (kJ mol ⁻¹)
V_{cmax}	70,19	200,00
J_{max}	55,61	187,52

gemittelt und sind in Tabelle 2.3 gezeigt. Als Referenzwerte P_{Ref} werden die mit Gleichung 2.6 und 2.7 ermittelten Werte eingesetzt. ΔS (kJ K⁻¹ mol⁻¹) wird als eine Art Entropiefaktor verstanden (Medlyn et al., 2002) und ergibt sich nach Medlyn et al. (2002) aus der Optimumstemperatur T_{opt} (K) des jeweiligen Reaktionskomplexes der Photosynthese:

$$\Delta S = \frac{H_d}{T_{opt}} + \mathcal{R} \cdot \ln\left(\frac{H_a}{H_d - H_a}\right) \quad (2.18)$$

Kapitel 3

Materialien und Methoden

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung von CABIN, eines Modells der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels, dessen Prüfung sowie die Untersuchung der Bedeutung einiger Parameter von CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels.

Das Kapitel Materialien und Methoden gliedert sich in vier Teile. Im ersten Teil (Abschnitt 3.1) werden die Grundlagen des Modells CABIN beschrieben. Dies beinhaltet die Koppelung von CABIN mit den beschriebenen bestehenden Modellen (Abschnitt 3.1.1), den Überblick über die Pools und Flüsse in CABIN (3.1.2), die Repräsentation der Phytomasse (3.1.3), den Umgang mit Referenz- und Standardwerten (3.1.4), den Aufbau der Teilmodelle (Erweiterung des Photosynthesemodells in 3.1.5, Respirationmodell in 3.1.6, Speicherungsmodell in 3.1.7 und Allokationsmodell in 3.1.8), die Beschreibung der Bilanzierung des interzellularen CO₂ in Abschnitt 3.1.9, die Beschreibung der Berechnung der NPP in 3.1.10 sowie des Differentialgleichungssystems in 3.1.11. Schließlich wird in Abschnitt 3.1.12 die Modellkonfiguration und die Initialisierung der Modellläufe vorgestellt.

Der zweiten Teil (Abschnitt 3.2) beschäftigt sich mit den verwendeten Vergleichsdaten, mit denen die Ergebnisse der mit CABIN angestellten Berechnungen verglichen wurden. Hier wird insbesondere auf die Auswahl der Messorte eingegangen.

Der dritte Teil des Kapitels (Abschnitt 3.3) beschäftigt sich mit den zum Betreiben von CABIN eingesetzten Zustandsdaten und treibenden Kräften. Hier werden die zugrunde gelegten Phytomassen und Stickstoffmengen (Abschnitt 3.3.1), die Referenztemperaturen (3.3.2), die atmosphärische CO₂-Konzentration (3.3.3) und die eingesetzten Wetterdaten (3.3.4) angesprochen.

Der vierte Teil (Abschnitt 3.4) beschäftigt sich mit der Vorgehensweise zur Prüfung der Teilmodelle der Photosynthese (3.4.1.1) und der Respiration (3.4.1.2) sowie des Ansatzes zur Bestimmung der Menge lebenden Gewebes im Holz (3.4.1.3). Abschnitt 3.4.2 beschäftigt sich mit der Anwendung von CABIN für ausgewählte Testorte. In Abschnitt 3.4.3 wird die Vorgehensweise bei der Prüfung von CABIN beschrieben. Es wird beschrieben, wie Teilergebnisse (CO₂-Konzentration im Blatt, CO₂-Flüsse, Stomataleitfähigkeiten, Kohlenhydratpools) geprüft wurden (3.4.3.1) und wie Abweichungen von gemessenen NPP-Daten untersucht wurden (3.4.3.2). Des Weiteren wird in Abschnitt 3.4.4 die Vorgehensweise bei der Untersuchung der Bedeutung einzelner Parameter für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels beschrieben.

3.1 Das Modell CABIN

In diesem Abschnitt wird das Modell CABIN vorgestellt. Im ersten Abschnitt (3.1.1) wird gezeigt, wie CABIN mit NCIM und GIWACOM gekoppelt wird. Es folgt in Abschnitt 3.1.2 ein Überblick über die in CABIN implementierten Pools und Flüssen. Anschließend werden in den Abschnitten 3.1.5 bis 3.1.8 Konzept und Grundlagen der für CABIN neu entwickelten Teilmodelle beschrieben. Die mathematischen Beschreibungen sind Ergebnisse dieser Arbeit und finden sich demzufolge im Ergebnisteil. Abschnitt 3.1.9 beschäftigt sich mit der Bilanzierung des interzellularen CO_2 , Abschnitt 3.1.10 mit der Nettoprimärproduktivität und in Abschnitt 3.1.11 wird das Differentialgleichungssystem vorgestellt. Abschließend werden in Abschnitt 3.1.12 Aspekte der Durchführung von Modellläufen besprochen.

3.1.1 Kopplung mit den bestehenden Modellen

CABIN soll folgende Funktionen erfüllen:

- Bereitstellung der Nettoprimärproduktivität zur Verwendung in einem globalen Modell des C- und N-Kreislaufs (hier NCIM) als Bilanz aus Photosynthese und Respiration (siehe Abschnitt 3.1.10).
- Berechnung der interzellularen CO_2 -Konzentration, wie sie in GIWACOM zur Steuerung der stomatären Leitfähigkeit benötigt wird^a.

Die Schnittstellen zwischen CABIN, GIWACOM und NCIM sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Schnittstelle mit NCIM ist in der aktuellen Version noch nicht dynamisch realisiert; die entsprechenden Daten werden aus Dateien eingelesen.

3.1.2 Überblick über CABIN

Folgende Teilmodelle von CABIN wurden im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt^b:

- Modell der Respiration
- Modell der Optimumstemperatur der Photosynthese^c
- Modell der Verringerung der Photosynthese bei hohen Assimilatkonzentrationen^c
- Modell der Kohlenstoffspeicherung
- Modell der Kohlenstoffallokation

In Abbildung 3.2 ist ein schematischer Überblick über das Modell CABIN dargestellt. Zentral steht der Assimilatpool (Assim), der die frei verfügbaren löslichen Kohlenhydrate enthält. Dieser Pool wird gespeist von der Photosynthese und aus ihm wird durch Respiration und Allokation Kohlenstoff entnommen. Außerdem steht er mit einem Pool von Reservekohlenhydraten (ResC) über die Prozesse Speicherung

^aDie interzelluläre CO_2 -Konzentration c_i für die Berechnung der Photosynthese sollte nicht von derjenigen zur Berechnung der stomatären Leitfähigkeit abweichen. Aus diesem Grund wird c_i nicht wie in der Originalversion von GIWACOM berechnet.

^bübernommene Modelle sind hier nicht aufgelistet

^cals Ergänzung des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Photosynthesemodells.

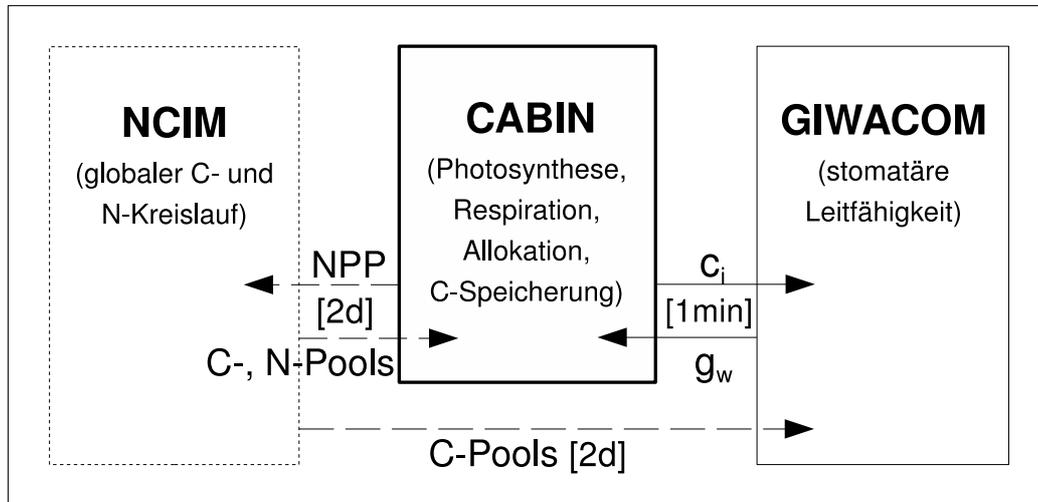


Abbildung 3.1: Koppelungsschema von GIWACOM, NCIM und CABIN. Die Modelle sind als Rechtecke dargestellt. Pfeile zeigen die Richtung der Datenübergabe an. In eckigen Klammern sind die Zeitschritte (min - Minuten, d - Tage) angegeben, in denen der Datenaustausch stattfindet. CABIN ist an GIWACOM gekoppelt und übergibt für jede Modellminute die interzelluläre CO_2 -Konzentration c_i an GIWACOM, welches im Gegenzug die stomatäre Leitfähigkeit g_s bereitstellt. CABIN kann die modellierte NPP jeden zweiten Modelltag an NCIM übergeben. NCIM versorgt im Gegenzug CABIN und GIWACOM mit C- und N-Pools. Als gestrichelte Pfeile dargestellte Datenübergaben sind in der aktuellen Version noch nicht dynamisch realisiert; die entsprechenden Daten werden aus Dateien eingelesen.

und Remobilisierung in Verbindung. Assim und ResC werden als gleichmäßig über das lebende Gewebe der Pflanze verteilt angenommen. Transportprozesse werden daher nicht explizit beschrieben.

3.1.3 Phytomasse

Die Phytomasse ist in NCIM in vier Kompartimente aufgeteilt. Es wird unterschieden zwischen ober- und unterirdischer und jeweils holziger und krautiger Phytomasse. CABIN wird an diese Struktur angepasst. Das oberirdische krautige Kompartiment wird dabei als die Summe aller Blätter und grünen Sprosse, das oberirdische holzige als Summe aller holzigen Organe wie Stämme, Äste und Zweige, das unterirdische holzige als Wurzel und das unterirdische krautige Kompartiment als Feinwurzel verstanden. Für jedes Kompartiment gibt es je einen Kohlenstoff- und Stickstoffpool.

Da in NCIM der von der Vegetation gespeicherte Reservestickstoff nicht als Teil der Phytomasse interpretiert wird, wird in CABIN auch der gespeicherte Kohlenstoff nicht als Teil der Phytomasse interpretiert. Die von NCIM bestimmten Phytomassen sind also als reine Strukturphytomassen zu verstehen.

In dieser Arbeit werden alle Stoffmassen als Kohlenstoff- oder Stickstoffäquivalente dargestellt. Es wird durchgängig, wie in NCIM und GIWACOM, angenommen, dass der Kohlenstoffanteil an der Phytomasse 45 % beträgt. Bezugsgrößen für Flüsse und Pools sind entweder die Kohlenstoffmasse oder die Grundfläche Boden, selten die Blattfläche.

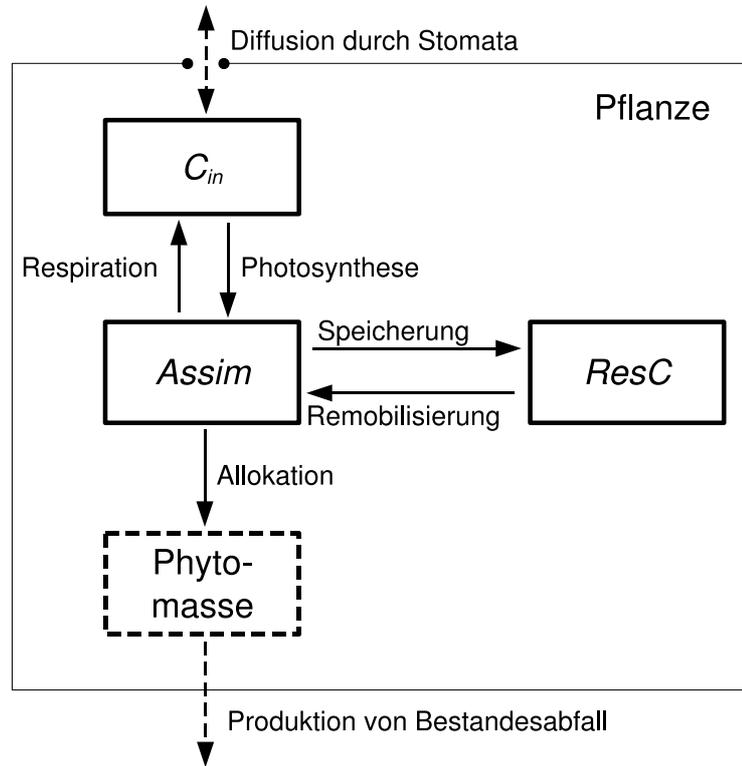


Abbildung 3.2: Diagramm der Kohlenstoffflüsse und Pools. Symbole: C_{in} – CO₂-Pool im Blatt, $Assim$ – Pool der Assimilate (lösliche Kohlenhydrate), $ResC$ – Pool der Reservekohlenhydrate. Gestrichelt dargestellte Objekte sind nicht Teil von CABIN. Die Phytomasse wird von NCIM bereitgestellt, die Stomatalfähigkeit zur Berechnung der CO₂-Diffusion von GIWACOM.

3.1.4 Referenz- und Standardwerte

Für den Einfluss der Stickstoffkonzentration auf die Prozesse wird angenommen, dass die verschiedenen Vegetationstypen bei einer Standardkonzentration gleiche Umsatzraten aufweisen (siehe Abschnitt 1.4.2). Bei Abweichung von dieser Konzentration wird die Intensität des Prozesses entsprechend herauf oder herunter skaliert.

Analog dazu wird für die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Prozesse angenommen, dass sich die verschiedenen Vegetationstypen bei ihrer Anpassungs- bzw. Referenztemperatur gleich verhalten und auch die Reaktion auf Abweichungen von dieser Referenztemperatur global einheitlich ist. Um die Temperaturabhängigkeit der Prozesse in CABIN abzubilden wird daher mit der Abweichung der herrschenden von der Referenztemperatur gearbeitet.

Die Referenztemperatur ist als die Temperatur zu verstehen, an die die Pflanzen angepasst sind. Sie ist die Temperatur, bei der ein Prozess mit Referenzintensität abläuft. Eine Referenztemperatur ist ein rein theoretisches Konstrukt und kann nicht durch Messungen bestimmt werden. Sie existiert nur im Kontext eines Modells zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit und muss in diesem Zusammenhang definiert werden. Das heißt, es muss entweder eine Referenztemperatur festgelegt werden und die dazugehörige Intensität des Prozesses bestimmt werden, oder es muss eine Referenzintensität festgelegt und dann bestimmt werden, bei welcher Temperatur diese auftritt.

3.1.5 Erweiterung des Photosynthesemodells

Als Modell der Photosynthese wird in dieser Arbeit das von Kull und Kruijt (1998) publizierte Modell verwendet (Abschnitt 2.3); die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese wird nach Medlyn et al. (2002) umgesetzt (Abschnitt 2.3.2).

In den folgenden Abschnitten geht es um Erweiterungen des Photosynthesemodells, die die Abschätzung der Optimumstemperatur der Photosynthese und die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern betreffen. Es werden, wo angebracht, inhaltliche Grundlagen dargestellt und die Ansätze der Modellbildung beschrieben.

Abschätzen der Optimumstemperatur. Um bei der Berechnung der Photosynthese die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen, muss mit Gleichung 2.18 der Faktor ΔS berechnet werden (siehe Abschnitt 2.3.2). Als Eingabewert wird dabei die Optimumstemperatur für V_{cmax} und J_{max} benötigt. Weil für diese kein global anwendbares Modell bekannt ist, wurde für diese Arbeit ein Ansatz entwickelt. Es musste ein Zusammenhang zwischen der Optimumstemperatur und einer bereits in CABIN vorhandenen Größe aufgestellt werden. Hier eignete sich die in den Teilmodellen von CABIN häufig verwendete Referenztemperatur (siehe Abschnitt 3.1.4).

Um eine Funktion für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Optimums- und Referenztemperatur zu entwickeln wurden Daten von Medlyn et al. (2002) verwendet. Medlyn et al. (2002) zeigen Messdaten der Optimumstemperatur für V_{cmax} und J_{max} und zugehörige Wachstumstemperaturen. Mangels genauerer Angaben wurde angenommen, dass die für diese Messungen verwendeten Pflanzen konstant bei der angegebenen Wachstumstemperatur aufgezogen wurden. In einem solchen Fall kann die Referenztemperatur mit der Wachstumstemperatur gleich gesetzt werden.

Um für CABIN eine mathematische Beschreibung der Herleitung der Optimums- aus der Referenztemperatur zu erstellen, wurde die Optimumstemperatur graphisch gegen beide möglichen Quotienten aus Optimums- und Referenztemperatur aufgetragen. Der nach visueller Untersuchung deutlicher erscheinende Zusammenhang wurde ausgewählt. Die resultierende lineare Funktion wurden separat für V_{cmax} und J_{max} aufgestellt (Abschnitt 4.1.1.1).

Nach Chapin und Oechel (1983) liegt die Optimumstemperatur immer über der Durchschnittstemperatur am Standort. Da die zum Antrieb von CABIN in dieser Arbeit eingesetzten Daten der Referenztemperatur auf Durchschnittstemperaturen basieren (siehe Abschnitt 3.3.2), muss also die Optimumstemperatur auch über der Referenztemperatur liegen. Setzt man die Referenztemperatur in der Einheit °C in Gleichung 4.2 (siehe Seite 65) ein, so ergeben sich bei Referenztemperaturen unter 0°C jedoch für die Optimumstemperaturen geringere Werte als die Referenztemperatur. Aus diesem Grund muss die Referenztemperatur hier in Kelvin eingesetzt werden.

Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern. Es wird vermutet, dass hohe Gehalte an Kohlenhydraten eine Herunterregulation der Photosynthese verursachen (Sonnewald, 2001). Ein möglicher Mechanismus dafür auf einer kurzen Zeitskala wäre die Endprodukthemmung an der Photosynthese beteiligter Enzyme durch die Ansammlung von Assimilaten (Sonnewald, 2001).

In dieser Arbeit soll die Möglichkeit der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern berücksichtigt werden. Dieser Prozess ist nicht im Detail verstanden, so dass einige Annahmen gemacht werden müssen, um eine mathematische Beschreibung aufstellen zu können.

Basierend auf Aussagen von Geiger et al. (2000) wird die Verringerung der Photosynthese in CABIN von den Assimilaten abhängig gemacht. Es wird angenommen, dass die Photosynthese zurück geht, wenn der Assimilatpool über einen festzulegenden relativen Füllstand (Poolgröße dividiert durch Kapazität des Pools) steigt. Für Füllstände oberhalb dieser Schwelle wird angenommen, dass die Photosynthese linear mit steigendem Füllstand sinkt und bei vollständig gefülltem Pool nur noch zehn Prozent der üblichen Photosynthese ablaufen.

Der Einfluss der Assimilate auf die Photosynthese wird auf Basis der Aussagen von Sharkey (1990) in CABIN durch die Verringerung der maximalen Elektronentransportrate (J_{max} , Gleichung 2.6) und der maximalen Carboxylierungsrate (V_{cmax} , Gleichung 2.7) realisiert.

Die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern wird nicht in die Grundkonfiguration von CABIN einbezogen. Sie wird nur bei speziellen Modellläufen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.4.4.9). Die aufgestellte Funktion findet sich im Ergebnisteil (Abschnitt 4.1.1.2).

Parametrisierung. Das Photosynthesemodell von CABIN wurde auf Basis einer noch unveröffentlichten Zusammenstellung von Daten zur Photosynthese von C₃-Pflanzen (Kattge, persönliche Mitteilung) parametrisiert. Die Werte für die Parameter sind bei der Beschreibung des Photosynthesemodells in Abschnitt 2.3 angegeben.

Die Gleichung zur Bestimmung der Optimumstemperatur wurde mit der Methode der kleinsten Abstandsquadrate parametrisiert. Die für die Parameter ermittelten Werte finden sich im Ergebnisteil (Abschnitt 4.1.1.1).

Das Modell zur Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern wurde auf Basis von Annahmen parametrisiert, da Literaturdaten über relative Füllstände oder Füllstandsschwellen nicht vorliegen^d. Die eingesetzten Parameterwerte finden sich bei der Beschreibung der Untersuchung des Einflusses der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratpools in Abschnitt 3.4.4.9 und bei der Darstellung der mathematischen Umsetzung in Abschnitt 4.1.1.2.

3.1.6 Das Respirationmodell

Der Begriff Respiration bedeutet im engeren Sinne Atmung, meint also den Sauerstoff verbrauchenden Abbau von Stoffen (Glucose, Saccharose, Fructane, Lipide etc.) zur Energiegewinnung. Bei diesem Abbau energiereicher Substanzen wird im Rahmen von Glykolyse und Krebszyklus CO₂ frei. Diese Arbeit beschäftigt sich zentral mit dem Kohlenstoffgaswechsel der Vegetation. Aus diesem Grund wird der Begriff Respiration hier speziell für die CO₂-freisetzenden Vorgänge verwendet. Ist also z. B. von einer Verringerung der Respiration die Rede, bedeutet dies nicht zwingend, dass auch eine Verringerung der O₂-Aufnahme damit einher geht.

^dDaten zu Assimilatkonzentrationen sind hier nicht verwendbar, da diese entweder nicht zusammen mit Messungen der Photosynthese oder nur in so geringem Umfang vorliegen, dass sich keine Kapazität des Pools ermitteln und kein quantitativer Einfluss auf die Photosynthese herleiten lässt.

Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wie die Respiration mit dem Angebot an abbaubarem Substrat und dem Bedarf an Energie zusammenhängt. Dabei werden diejenigen Zusammenhänge berücksichtigt, die der Entwicklung des Respirationsmodells von CABIN zugrunde lagen. Anschließend werden die im Respirationsmodell von CABIN berücksichtigten Einflussgrößen angesprochen. Abschließend wird das Konzept des Respirationsmodells beschrieben, die Einbindung der Verringerung der Respiration bei Licht erklärt und die Berechnung der Menge lebenden Gewebes in holzigen Kompartimenten vorgestellt. Außerdem wird die Berechnung der Respiration der verschiedenen Kompartimente der Vegetation und die Parametrisierung des Respirationsmodells beschrieben.

3.1.6.1 Bedarfs- und angebotsorientierte Beschreibung

Aufgabe der Respiration im Metabolismus der Zelle ist es, Energie, Reduktionsäquivalente und Kohlenstoffverbindungen für Syntheseprozesse bereitzustellen. Wichtige energiebedürftige Prozesse sind die Synthese von Stoffen zur Bildung neuer Zellen, die Nitratreduktion, die Phloembeladung, der Protein- und Membranumsatz (Neubildung abgebauter Strukturen), die Aufrechterhaltung von Ionengradienten zwischen der Zelle und ihrer Umgebung bzw. zwischen Kompartimenten der Zelle (Cannell und Thornley, 2000) und, auf Ebene der gesamten Pflanze, die Aufnahme von Stickstoff und anderen Nährstoffen aus dem Boden. Der Energiebedarf dieser Prozesse bestimmt nach der bedarfsorientierten Sichtweise die Respiration.

Die Respiration wird oft in zwei Komponenten aufgeteilt: Wachstums- und Erhaltungssatmung (Amthor, 2000). Die Erhaltungssatmung soll den Teil der Respiration beschreiben, den es bedarf, um ein Gewebe intakt zu halten. Die Wachstumsatmung ist dann diejenige Respiration, die den Energiebedarf der Wachstumsprozesse erfüllt. Eine solche Unterscheidung ist jedoch auf molekularer Ebene nicht nachvollziehbar. So würde z. B. die Bereitstellung von Energie für die Synthese von Speicherstärke grundsätzlich zum Wachstum gezählt (Massenzunahme speichernder Organe), wobei nicht klar ist, wofür diese Ressourcen später verwendet werden. Auch müsste bei der Synthese jedes ATP-Moleküls determiniert sein, wofür dieses später verwendet wird. Außerdem können viele Synthesen nicht eindeutig einer der beiden Komponenten zugeordnet werden, wie z.B. die Synthese von Phospholipiden, die als Ersatz für bestehende Membranbestandteile, aber auch zur Vorbereitung der Zellteilung synthetisiert werden. Analoge Schlüsse zieht Bouma (2005). Dennoch ist davon auszugehen, dass eine lebende Zelle einen gewissen respiratorischen Grundumsatz hat, auch wenn dieser über Messungen praktisch unzugänglich ist.

In der angebotsorientierten Sicht der Respiration stellen die zur Veratmung zur Verfügung stehenden Kohlenhydrate das Angebot dar. Ein Zusammenhang zwischen der Kohlenhydratkonzentration und der Atmung ist in vielen Studien gezeigt worden (siehe Übersichtsartikel: Amthor, 1989; Bunce, 2005; Noguchi, 2005; Flexas et al., 2005); es wird jedoch auch von gegenteiligen Ergebnissen berichtet (siehe Übersichtsartikel: Amthor, 1989; Noguchi, 2005).

Zumindest wenn das Substratangebot verknappt, so dass der Bedarf nicht mehr gedeckt werden kann, muss eine Limitierung der Respiration durch das Angebot auftreten. Amthor (1989) schreibt in seinem Übersichtsartikel über Untersuchungen, die dies bestätigen, indem sie zeigen, dass der Zusammenhang der Kohlenhydratkonzentration mit der Respiration bei hohen Konzentrationen nicht mehr gegeben ist.

Nach Farrar und Williams (1991) bezieht sich der Zusammenhang nur auf im Cytosol gelöste Zucker. Stärkereserven haben demnach keinen Einfluss auf die Respiration.

3.1.6.2 Einflussgrößen

Neben den Kohlenhydraten werden weitere Einflussgrößen in CABIN berücksichtigt. Deren Zusammenhang mit der Respiration wird im Folgenden dargestellt.

Stickstoff. Zusammenhänge zwischen gemessener Respiration und Stickstoff konnten für Blätter und Nadeln (Ryan, 1995; Reich et al., 1996, 1998b,c; Kattge, 2002; Vose und Ryan, 2002), Wurzeln (Ryan, 1995; Reich et al., 1998c; Vose und Ryan, 2002) und holzige Gewebe (Lavigne et al., 1996; Vose und Ryan, 2002) gezeigt werden. Reich et al. (2006) konnten in einer Metastudie zeigen, dass sowohl die Respiration der oberirdischen Organe als auch die der gesamten Pflanze mit dem Stickstoffgehalt korreliert.

Der Umsatz von Proteinen und die Aufrechterhaltung von Ionengradienten sind die hauptsächlichen Energie verbrauchenden Prozesse, ohne die die Zelle nicht überleben kann (Penning de Vries, 1975; Amthor, 1984). Da man den Stickstoffgehalt als ein gutes Maß für Proteingehalt und metabolische Aktivität sehen kann (Ryan, 1995), sollte der lebenserhaltende respiratorische Grundumsatz eine Funktion des Stickstoffgehalts sein (Ryan, 1991b).

Es findet sich auch ein Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt und dem relativen Massenzuwachs (Hirose, 1988). Es sollte sich also insgesamt ein Zusammenhang zwischen Stickstoff und Respiration herstellen lassen, unabhängig davon, ob die bereitgestellte Energie dem Grundumsatz, dem Wachstum oder weiteren Zwecken zugeführt wird.

Licht. Die mitochondriale CO_2 -Freisetzung im Blatt läuft bei Licht mit geringerer Intensität ab, die teilweise nur 25 % der Respiration bei Dunkelheit entspricht (Krömer, 1995). Die Aktivität der mitochondrialen Elektronentransportkette und die damit einhergehende ATP-Bildung ist notwendig, um die Saccharosesynthese im Cytosol mit Energie zu versorgen. Im Krebszyklus müssen bei Licht mindestens die Reaktionen von Malat bis Zitrat stattfinden (Tcherkez et al., 2005), um Syntheseprozesse im Cytosol mit Kohlenstoffgerüsten zu versorgen (Amthor, 1989; Atkin et al., 2000b; Noguchi, 2005). Ein auf solche Art nur teilweise laufender Krebszyklus reduziert die CO_2 -Abgabe aus den Mitochondrien, da die decarboxylierenden Schritte nicht stattfinden.

Glycin aus der Photorespiration ist bei Licht das Hauptsubstrat der Mitochondrien (Krömer, 1995), und das bei dessen Decarboxylierung anfallende $\text{NADH}+\text{H}^+$ trägt maßgeblich zur ATP-Produktion und somit zum O_2 -Verbrauch bei. Bykova et al. (2005) konnten zeigen, dass eine Hemmung der Photorespiration zu einem Anstieg der mitochondrialen Respiration führt. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass bei Licht die Decarboxylierung im Rahmen des Krebszyklus deutlich verringert ist, da das $\text{NADH}+\text{H}^+$ für die ATP-Synthese aus anderen Quellen stammt.

Temperatur. Da meist kein Temperaturoptimum der Respiration gefunden wird, wird zur Beschreibung weithin ein Q_{10} -Ansatz verwendet (Atkin et al., 2005). Gemessene Q_{10} -Werte unterscheiden sich kaum zwischen Blatt und Wurzel (Atkin et al.,

2005); auch unterscheiden sich die in verschiedenen Vegetationstypen gefundenen Q_{10} -Werte nicht systematisch voneinander (Tjoelker et al., 2001).

Der Grad der Temperaturabhängigkeit, also der Wert des Q_{10} , sinkt mit steigender Temperatur aufgrund der Verringerung der benötigten Aktivierungsenergie (Tjoelker et al., 2001). Die Temperaturabhängigkeit der Respiration könnte deshalb saisonal unterschiedlich sein. Es kamen jedoch auch Studien zu dem Ergebnis, dass der Q_{10} über das Jahr konstant ist (Linder und Troeng, 1981; Burton et al., 2002).

3.1.6.3 Modellbildung

Für diese Arbeit wurde ein neues Respirationsmodell erstellt. Es berücksichtigt sowohl die angebots- als auch die nachfrageorientierten Aspekte der Respiration. Als Maß für die Nachfrage wird die Stickstoffkonzentration im Gewebe und als Maß für das Angebot die Konzentration an löslichen Kohlenhydraten verwendet. Außerdem werden Temperatur und Strahlung als weitere Einflussgrößen einbezogen. Die für das Respirationsmodell entwickelten Funktionen finden sich im Ergebnisteil (Abschnitt 4.1.2).

Das Respirationsmodell wird in drei Stufen aufgebaut. Am Anfang steht die direkte Abhängigkeit der Respiration vom Angebot in Form der Assimilatkonzentration. Hier wird berücksichtigt, dass der Zusammenhang zwischen Respiration und Kohlenhydratangebot mit zunehmendem Angebot schwächer wird (Amthor, 1989).

Auf der zweiten Stufe wird der Respirationskoeffizient, der diesen Respiration-Assimilat-Zusammenhang beschreibt, von der Stickstoffkonzentration abhängig gemacht. Sein Wert darf nicht null oder kleiner werden. Ein Maximalwert sollte auch bei sehr hohen Stickstoffkonzentrationen nicht überschritten werden. Mit zunehmender Stickstoffkonzentration flacht der Zusammenhang ab, da zunehmend höhere Anteile von Reserveformen des Stickstoffs auftreten, diese aber den Energiebedarf nicht erhöhen. Die Stickstoffkonzentration geht nicht direkt in die Berechnung ein. Statt dessen wird mit der Abweichung von einer Standardkonzentration gearbeitet (siehe Abschnitt 24).

Auf der dritten Stufe wird die Temperaturabhängigkeit der Respiration eingeführt. Dies geschieht auf Ebene der Koeffizienten, die den Respirationskoeffizienten von der Stickstoffkonzentration abhängig machen. Es wird ein Q_{10} -Ansatz verwendet. Außerdem wird angenommen, dass die Respirationskoeffizienten bei Referenztemperatur, also der Temperatur, an die die Vegetation angepasst ist, global einheitlich sind.

Verringerung der Respiration bei Licht. Die Respiration muss für die Blätter noch um den verringernden Einfluss der Strahlung korrigiert werden (siehe Abschnitt 3.1.6.2). Auf Basis der von Atkin et al. (2000a) für Schnee-Eukalyptus (*Eucalyptus pauciflora* Sieb. ex Spreng) publizierten Daten beginnt die Verringerung der Respiration schon bei sehr geringer Strahlung ($3 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und nimmt bis ca. $200 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ weiter zu. Der Teil der Respiration, der dann noch stattfindet, wird in der Literatur sehr unterschiedlich beziffert. Die Aussagen liegen zwischen keiner Verminderung und einer Verringerung um 85 % (Marsh et al., 1965; Chapman und Graham, 1974; Krömer, 1995). Für diese Arbeit werden hier 50 % angenommen.

Im Respirationsmodell wird der Einfluss der Strahlung über einen Koeffizienten realisiert, der mit der Respiration multiplikativ verknüpft wird. Er wird mittels einer

sigmoiden Funktion von der Strahlung abhängig gemacht und nimmt, mit steigender Strahlung sinkend, Werte zwischen 1,0 und 0,5 an.

Respirationsbeschreibung für die Kompartimente. Für die Berechnung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels muss die Respiration aller Kompartimente der Phytomasse (Abschnitt 3.1.3) bestimmt werden. Da für jedes Kompartiment ein eigener Stickstoffpool gegeben ist (Abschnitt 3.1.3) wird die auf die Phytomasse bezogene Respiration (Einheit $\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) für jedes Kompartiment separat bestimmt und danach auf Grundflächenbezug (Einheit $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$) umgerechnet. Dies geschieht über die Multiplikation mit der Phytomasse des jeweiligen Kompartimentes, wobei bei den holzigen Kompartimenten nur deren lebender und somit respirierender Teil berücksichtigt werden darf.

Da das Respirationsmodell aufgrund fehlender anderweitiger Messdaten nur für Blätter parametrisiert werden kann, werden zur Bestimmung der Respiration der übrigen Kompartimente drei grundsätzliche Annahmen gemacht:

1. Die Abhängigkeit der Respiration von Stickstoff, Kohlenhydraten und Temperatur ist in allen Kompartimenten gleich.
2. Das lebende Gewebe eines holzigen Kompartimentes hat die gleiche Stickstoffkonzentration wie das des zugehörigen krautigen Kompartiments.
3. Die Assimilatkonzentration und die Zugänglichkeit zu den Assimilaten ist in allen Kompartimenten gleich.

Nach diesem Prinzip wird je ein Respirationskoeffizient für das unter- und oberirdische krautige Kompartiment bestimmt. Diese werden dann auch zur Berechnung der Respiration des zugehörigen holzigen Kompartiments verwendet.

Bestimmung der Menge lebenden Gewebes in den holzigen Kompartimenten. In der vorliegenden Literatur gibt es nur wenige Informationen über die Menge lebenden Gewebes in holzigen Kompartimenten der Phytomasse. Eine Herleitung aus häufig aufgenommenen Messdaten wie Oberfläche oder Phytomasse ist nur schlecht möglich (Ryan, 1990). In dieser Arbeit wird die Menge lebenden Gewebes der holzigen Kompartimente daher auf Basis der zweiten im vorigen Absatz angegebenen Annahme einer gleichen Stickstoffkonzentration in den lebenden holzigen und zugehörigen krautigen Kompartimenten hergeleitet. Für das unterirdische holzige Kompartiment geschieht dies direkt. Für das oberirdische holzige Kompartiment wird zusätzlich noch die Möglichkeit gegeben, dem toten Holz einen Stickstoffanteil zuzuschreiben (Schulze, 2000). Für das unterirdische holzige Kompartiment wird angenommen, dass kein Stickstoff im toten Anteil enthalten ist.

Parametrisierung. Kattge (2002) hat neben den Messungen zur Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese (siehe Abschnitt 2.3.1) auch Messungen der Respiration vorgenommen. Diese Messungen wurden bei Dunkelheit an Blättern von Pflanzen sieben verschiedener Gattungen (elf Arten) durchgeführt. Die Messungen wurden nacheinander am gleichen Blatt bei fünf verschiedenen Temperaturstufen (15, 20, 25, 30, 33°C) und dies sowohl nach Licht- als auch nach Dunkelperioden vorgenommen. Zusätzlich wurde in den Blättern nach Abschluss der fünften Messung der

Stickstoffgehalt und der Gehalt an verschiedenen Kohlenhydraten bestimmt (Kattge, 2002).

Das Respirationsmodell ist so aufgebaut, dass es in mehreren aufeinander folgenden Schritten parametrisiert werden kann. Zuerst wird der Respirationskoeffizient, der den Zusammenhang zwischen Kohlenhydratkonzentration und Respiration beschreibt, bestimmt. Die dafür benötigten Kohlenhydratkonzentrationen nach den ersten vier Respirationsmessungen von Kattge (2002), wurden aus den Respirationsdaten und der jeweiligen Messungsdauer hergeleitet, da die Kohlenhydratkonzentration nur nach der fünften Messung bestimmt wurde. Es wurden nur die löslichen Kohlenhydrate einbezogen.

Im zweiten Schritt werden die Parameter bestimmt, die zur Beschreibung der Abhängigkeit des Respirationskoeffizienten von der Stickstoffkonzentration benötigt werden. Die Werte der Parameter werden durch Anpassen der Funktion an die gemessenen Stickstoffkonzentrationen und die hergeleiteten Respirationskoeffizienten mit Hilfe der Methode der kleinsten Abstandsquadrate bestimmt. Dies wird fünfmal durchgeführt, einmal für jede Temperaturstufe der Respirationsmessung. Für die daraus resultierenden fünf Werte der Parameter wird geprüft, ob sie einen Trend mit der Temperatur aufweisen. Zu diesem Zweck werden die Q_{10} -Werte jedes Parameters für jede der vier Temperaturspannen zwischen den Temperaturstufen bestimmt. Anhand dieser Werte wird entschieden, welche Parameter zum Einbringen der Temperaturabhängigkeit in das Respirationsmodell verwendet werden: Streuen die Q_{10} -Werte für einen Parameter um 1, so ist der Wert des Parameters nicht von der Temperatur abhängig. Er kann nicht zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit verwendet werden. Ergeben sich Werte über 1, wird der Parameter zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit benutzt. Es handelt sich dann nicht um einen statischen Parameter sondern um einen mit der Temperatur veränderlichen Koeffizienten.

Für die nicht zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit ausgewählten Parameter wird der Mittelwert der fünf bestimmten Werte eingesetzt. Mit diesen festgelegten Parametern werden dann die zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit gewählten Parameter erneut an die Messwerte angepasst, und die Q_{10} -Werte bestimmt.

Es wird geprüft, ob sich für den Q_{10} selber einen Trend mit der Temperatur feststellen lässt. Ist dies nicht der Fall, wird der Mittelwert der wie oben beschrieben bestimmten Q_{10} -Werte ins Respirationsmodell eingesetzt.

Im letzten Schritt sind die Referenzwerte zu bestimmen, auf die sich die Q_{10} -Werte beziehen. Zu diesem Zweck wird das gesamte Respirationsmodell zu einer einzigen Gleichung zusammengefasst, integriert und nach der entsprechenden Variable aufgelöst.

Um den optimalen Wert für den Parameter zu finden, der verwendet wird, um den Einfluss der Kohlenhydrate bei hohen Konzentrationen zu verringern, wurde der gesamte Parametrisierungsvorgang mehrfach durchgeführt. Für den entsprechenden Parameter wurden dabei Werte zwischen 0 und 0,6 in Schritten von 0,01 eingesetzt. Zur Bewertung der Parametrisierung wurde der Korrelationskoeffizient zwischen der modellierten und der gemessenen Respiration bestimmt. In CABIN wird der zum höchsten Korrelationskoeffizienten führende Wert eingesetzt.

Die mathematische Beschreibung des Parametrisierungsvorgangs mit den dazu entwickelten Funktionen sind im Ergebnisteil (Abschnitt 4.1.2.4) dargestellt.

Zur Parametrisierung des Respirationsmodells wurde ein Computerprogramm

Tabelle 3.1: Festgelegte Werte für den Verlauf der Funktion zur Verringerung der Blattrespiration mit zunehmender Strahlung. Der Koeffizient k_l gibt die Fraktion der Dunkelrespiration an, die auch bei Licht stattfindet.

Strahlung ($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	25	50
k_l	1	1	1	1	1	0,98	0,92
Strahlung ($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	100	150	175	180	185	190	200
k_l	0,75	0,55	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

entwickelt, das den gesamten Vorgang automatisch durchführt. Es basiert auf Code in den Programmiersprachen FORTRAN und Perl und verwendet die least square Routine des Grafikprogramms `gnuplot` zur Anpassung der Funktionen.

Zur Parametrisierung der Funktion zur Verringerung der Respiration bei Licht liegen keine geeigneten Messdaten vor. Es wurden daher 14 Wertepaare von Strahlung und einem zugehörigen Wert des Koeffizienten zur Verringerung der Respiration bei Licht (k_l) auf Basis der im Abschnitt „Verringerung der Respiration bei Licht“ auf Seite 29 vorgestellten Daten festgelegt (Tabelle 3.1). An diese Daten wurde die Funktion zur Berechnung von k_l mit der Methode der kleinsten Abstandquadrate angepasst wurde.

3.1.7 Das Speicherungsmodell

Als Speicherung wird in dieser Arbeit die Bildung von Speicherstoffen wie Stärke, Fructanen, löslichen Zuckern oder Fetten (Höll, 1997) verstanden, die später zu Biosynthesezwecken für Metabolismus oder Strukturbildung verwendet werden können (Chapin et al., 1990). Der Abbau von Speicherstoffen zur Nutzung als Energiequelle oder zur Strukturbildung wird als Remobilisierung bezeichnet.

Als interne Kohlenstoffpools enthält CABIN Assimilate (*Assim*) und Reservekohlenhydrate (*ResC*). Für beide Pools wird eine Kapazität angenommen, die jedoch in Situationen, in denen der Kohlenhydraterwerb den Verbrauch übersteigt, auch überschritten werden kann. Zwischen dem *Assim*- und dem *ResC*-Pool werden ein Speicherungs- und ein Remobilisierungsfluss eingerichtet (siehe Abbildung 3.2). Es wird angenommen, dass sowohl die Assimilate als auch die Reservekohlenhydrate gleichmäßig über das lebende Gewebe der Pflanze verteilt sind.

Um Kohlenstoffreserven für Zeiten mit geringer oder nicht stattfindender Photosynthese zu bilden, findet Speicherung von Kohlenstoff statt. Der Speicherungsfluss nimmt mit zunehmendem Füllstand des Assimilatpools zu und mit zunehmendem Füllstand des *ResC*-Pools ab. Er wird von der aktuellen Größe des Assimilatpools abhängig gemacht, damit bei leerem Assimilatpool auch keine Speicherung mehr erfolgt. Der Speicherung wird in CABIN eine hohe Priorität im internen Kohlenstoffhaushalt der Vegetation zugewiesen.

Die Remobilisierung von Reservekohlenhydraten findet bei Verknappung der Assimilate statt. Es wird dafür relativ zur Kapazität des Assimilatpools eine Remobilisierungsschwelle definiert. Sinkt der Füllstand des Assimilatpools unter diese Schwelle, so wird remobilisiert. Die Menge zu remobilisierender Kohlenhydrate hängt

zusätzlich vom Füllstand des Reservepools ab, geht jedoch mit dessen Zunahme in eine Sättigung über.

Die Kapazitäten der Kohlenhydratpools werden relativ zu den Phytomassen festgelegt. Dabei wird die Kapazität des Assimilatpools von der lebenden und die des *ResC*-Pools von der toten Phytomasse abhängig gemacht. Auf diese Weise wird die größere Speicherfähigkeit holziger Pflanzen berücksichtigt, ohne vegetationstypabhängig parametrisieren zu müssen.

Die aufgestellten Funktionen und Parameter finden sich im Ergebnisteil (Abschnitt 4.1.3).

Parametrisierung. Die Kapazitätsparameter werden für den Assimilatpool aus Literaturdaten über die Assimilatkonzentration in Blättern hergeleitet. Die maximal gefundenen Konzentrationen werden als Kapazitäten interpretiert. Die höchsten vorliegenden Werte sind $0,14 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{ gC}^{-1}$ für *Populus x euramericana* (Curtis et al., 1995) und ebenfalls $0,14 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{ gC}^{-1}$ für *Festuca rubra* (Goverde et al., 2002).

Für den Reservepool ist eine solche Vorgehensweise nicht möglich, da keine Daten über die Menge der toten Holzphytomasse in Zusammenhang mit Kohlenhydratmessungen vorliegen. Hier wurde der Wert des Parameters geschätzt. Es wurde dazu angenommen, dass die auf das tote Holz bezogene maximale Reservekohlenhydratkonzentration im Bereich der im lebenden Holz gemessenen maximalen Stärkekonzentration liegt. Newell et al. (2002) berichten hier für die tropischen Bäume *Urera caracasana* und *Anacardium excelsum* Stärkekonzentrationen in den äußeren Bereichen des Stammes von $0,11 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{ gC}^{-1}$.

Da auch die Remobilisierungsschwelle nicht messbar ist, wurde ein Wert geschätzt. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Speicherungs- und Remobilisierungsprozesse wird auf eine Temperaturabhängigkeit der Parameter des Speicherungs- und Remobilisierungsflusses verzichtet.

3.1.8 Das Allokationsmodell

Allokation soll in dieser Arbeit als der Übergang von Kohlenstoff in Form von Zuckern, Fetten oder Ähnlichem in dauerhafte Strukturen verstanden werden. Strukturen in diesem Sinne sind Zellwände, Membranen, Proteine und DNA. Nicht zum Strukturmaterial zählen Metaboliten, kurzlebige Nukleinsäuren und Reservestoffe.

Der Begriff der Allokation wird häufig auch für die Verteilung von Assimilaten auf die verschiedenen Organe der Pflanze verwendet. Dies ist nicht in jedem Fall gleichbedeutend mit obiger Definition, da eine Translokation von Kohlenstoff auch temporär im Rahmen von Speicherungsprozessen stattfinden kann. In einem solchen Fall sollte besser von Kohlenstoffverteilung oder -verlagerung gesprochen werden.

Über die Kontrolle der Allokation und der Kohlenstoffverteilung auf die verschiedenen Organe auf quantitativer Ebene bestehen noch wenig gesicherte Erkenntnisse (Walter und Schurr, 2005).

Die Assimilate haben für die Allokation zwei Bedeutungen: Sie sind Substrat zur Energiegewinnung und gleichzeitig Kohlenstoffquelle der Strukturbildung. In CABIN wird die Allokation anhand der dafür zur Verfügung stehenden Energie bestimmt. Energiequelle ist die Respiration, die in CABIN als Summe von Grundumsatz und zur Neubildung von Strukturphytomasse erfolgender Respiration berechnet wird (siehe Abschnitt 3.1.6.3). Der Grundumsatz R_G ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{ gC}^{-1} \text{ s}^{-1}$) wird anhand

einer häufig verwendete Abschätzung von Ryan (1991a) aus der Stickstoffkonzentration hergeleitet:

$$R_G = 2,5249 \cdot 10^{-6} \cdot [N] \quad (3.1)$$

$[N]$ (gN gC^{-1}) steht hier für die Stickstoffkonzentration eines krautigen Kompartimentes. Der Proportionalitätsfaktor wurde in eine für diese Arbeit günstige Einheit umgerechnet^e.

Die verbleibende Respiration, also die Differenz zwischen der mit dem Respirationsmodell berechneten Respiration und dem Grundumsatz, stellt die Energie bereit, die zur Allokation verwendet werden kann. Nach Lambers et al. (1983) kann pro veratmetem Kohlenstoff die vierfache Menge Kohlenstoff allokiert werden. In CABIN wird die zu allokierte Menge auf 90 % des aktuell im Assimilatpool befindlichen Kohlenstoffs begrenzt, um im nächsten Zeitschritt noch Assimilate für den Grundumsatz zu haben und diesem eine Priorität gegenüber der Allokation zu geben.

Die so bestimmte Menge des zu allokierten Kohlenstoffs kann zukünftig im an NCIM gekoppelten CABIN zu jedem NCIM-Zeitschritt (zwei Tage) an NCIM übergeben werden. Dazu wird in CABIN der Fluss Allokation über jeweils zwei Tage in einem „Dummy“-Pool aufsummiert. Es ist der zu allokierte Kohlenstoff und nicht die Kohlenstoffbilanz (Respiration aller Kompartimente subtrahiert von der Photosynthese) zu übergeben, da Assimilate und Reservekohlenhydrate in NCIM nicht als Teil der Phytomasse angesehen werden (siehe Abschnitt 3.1.3).

3.1.9 Die Bilanzierung des interzellularen CO_2

Wie in Abschnitt 3.1.1 dargestellt übergibt CABIN an GIWACOM die interzelluläre CO_2 -Konzentration (c_i , $\mu\text{l l}^{-1}$). Wie in GIWACOM (Esser und Hoffstadt, 2000) wird der Kohlenstoffpool in den Interzellularen C_{in} ($\mu\text{molC gDW}^{-1}$) wie folgt bilanziert:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{g_s}{1,56} (c_a - c_i) \cdot 10^{-6} - A_{ph} + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} - \frac{c_a + c_i}{2} \cdot 10^{-6} \cdot e_{mol} \quad (3.2)$$

wobei c_a für die CO_2 -Konzentration in der Außenluft ($\mu\text{l l}^{-1}$) und R_{ha} für die Respiration des oberirdischen krautigen Kompartimentes ($\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) steht. g_s ist die Leitfähigkeit der Stomata für Wasser ($\mu\text{mol gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$).

Die molare Transpiration e_{mol} ($\mu\text{mol gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$) wird für diese Arbeit gleich null gesetzt. Diese Maßnahme wurde von Seekatz auf dem gesamten globalen $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ Gitter (geographische Länge mal Breite, 62 483 terrestrische Gitterelemente) geprüft. Er konnte nur auf sehr wenigen Gitterelementen eine Auswirkung auf die modellierte Stomataleitfähigkeit feststellen (Seekatz, persönliche Mitteilung).

Da die Stomatabewegungen und auch die Änderung von Photosynthese und Respiration wesentlich langsamer ablaufen, als die Diffusionsprozesse, kann hier angenommen werden, dass C_{in} innerhalb eines Zeitschrittes von CABIN zu einem Fließgleichgewicht (steady state) findet und damit auch die Konzentration c_i .

Zur steady state Bestimmung von c_i wird Gleichung 3.2, die die Änderung von C_{in} mit der Zeit beschreibt, gleich null gesetzt und nach c_i aufgelöst. Aufgrund der Struktur des Photosynthesemodells (Abschnitt 2.3) können sich fünf Fälle ergeben, die jeweils eine eigene steady state Lösung der Bilanzgleichung benötigen:

^eIn der Originalpublikation von Ryan (1991a) ist der Proportionalitätsfaktor mit $0,0106 \text{ mmolC mmolN}^{-1} \text{ h}^{-1}$ angegeben und wurde hier in $2,5249 \cdot 10^{-6} \text{ gC gN}^{-1} \text{ s}^{-1}$ umgerechnet.

1. Gesamter Bestand lichtgesättigt, überall limitiert das CO₂-Angebot.
2. Gesamter Bestand lichtgesättigt, überall limitiert die Elektronentransportrate.
3. Im oberen Bereich des Bestandes lichtgesättigt, limitiert durch das CO₂-Angebot, darunter lichtlimitiert.
4. Im oberen Bereich des Bestandes lichtgesättigt, limitiert durch die Elektronentransportrate, darunter lichtlimitiert.
5. Gesamter Bestand lichtlimitiert.

Fall drei ausgenommen ergeben sich nach c_i lösbar quadratische Gleichungen. Für Fall drei wird das Newton-Raphson-Verfahren zur Bestimmung der Nullstelle angewandt. Die zugehörigen Gleichungen sind im Anhang G aufgeführt.

3.1.10 Die Nettoprimärproduktivität

Die Nettoprimärproduktivität (NPP) ist die Nettokohlenstoffaufnahme der Vegetation. Sie stellt den Teil der Änderung der Summe der Kohlenstoffpools der Vegetation dar, der durch die Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels verursacht wird.

Die NPP wird bestimmt, indem die Bilanz des Kohlenstoffgaswechsels (Photosynthese abzüglich Respiration) der Vegetation über das Jahr in einem „Dummy“-Pool aufsummiert wird (Gleichung 3.5).

Ist CABIN im steady state^f, gleichen sich die Jahres-NPP und die Jahressumme der Allokation. Die Kohlenhydratpools befinden sich dann im Gleichgewicht mit den Gaswechselflüssen, so dass der gesamte gewonnene Kohlenstoff allokiert werden kann.

3.1.11 Das Differentialgleichungssystem

In diesem Abschnitt werden die Differentialgleichungen, die das durch CABIN modellierte System (Abbildung 3.2) beschreiben, dargestellt. Die Änderung des Assimilatpools $Assim$ mit der Zeit ergibt sich aus der Photosynthese, der Gesamtrespiration, der Allokation und der Bilanz der Flüsse zwischen Assimilat- und Reservekohlenhydratpool. Die Photosynthese A_{ph} ($\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$, Gleichung 2.15) muss dabei von Stoffmenge in Kohlenstoffmasse und über den Pool der Blattphytomasse C_{ha} (gC m^{-2}) auf Grundflächenbezug umgerechnet werden. Die Gesamtrespiration setzt sich aus der Respiration R ($\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) der vier Kompartimente zusammen (Gleichungen 4.9 bis 4.12), die über die jeweilige lebende Phytomasse hochgerechnet wird. Ebenso verhält es sich mit der Allokation $Allok$ ($\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$, Gleichung 4.26). Die mit dem Reservepool $ResC$ verbundenen Flüsse $F_{As \rightarrow R}$ (Speicherung, 4.20) und $F_{R \rightarrow As}$ (Remobilisierung, Gleichung 4.21) sind bereits auf die Grundfläche bezogen.

$$\begin{aligned}
 \frac{dAssim}{dt} = & A_{ph} \cdot \frac{12,011}{0,45 \cdot 10^6} \cdot C_{ha} \\
 & - (R_{ha}C_{ha} + R_{wa}C_{wa,l} + R_{hb}C_{hb} + R_{wb}C_{wb,l}) \\
 & - Allok \cdot (C_{ha} + C_{wa,l} + C_{hb} + C_{wb,l}) \\
 & - F_{As \rightarrow R} + F_{R \rightarrow As}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

^fUnter steady state (Fließgleichgewicht) wird in dieser Arbeit ein Zustand von CABIN verstanden, in dem mit den selben jährlichen Antriebsdaten mehrere Jahre in Folge die gleiche NPP berechnet wird.

Bei den Indizes der Respirationsflüsse und Phytomassepools steht a für oberirdisch (engl. aboveground), b für unterirdisch (engl. belowground), h für krautig (engl. herbaceous) und w für holzig (engl. woody). Ein l bezeichnet die lebende Fraktion eines Holzigen Pools.

Die Änderung des *ResC*-Pools mit der Zeit ergibt sich direkt aus der Bilanz von Speicherungs- und Remobilisierungsfluss:

$$\frac{dResC}{dt} = F_{As \rightarrow R} - F_{R \rightarrow As} \quad (3.4)$$

Die Nettophotosynthese entspricht den ersten beiden Summanden aus Gleichung 3.3 und wird über ein Jahr zur NPP in einem „Dummy“-Pool aufsummiert:

$$NPP = A_{ph} \cdot \frac{12,011}{0,45 \cdot 10^6} \cdot C_{ha} - (R_{ha}C_{ha} + R_{wa}C_{wa,l} + R_{hb}C_{hb} + R_{wb}C_{wb,l}) \quad (3.5)$$

Als Integrator wird ein Runge-Kutta Verfahren vierter Ordnung verwendet.

3.1.12 Durchführung der Modellläufe

3.1.12.1 Modellkonfiguration

CABIN ist modular programmiert. Für diese Arbeit wurden die Teilmodelle als Module zusammen mit GIWACOM betrieben und von dessen Hauptprogramm aufgerufen. Die Reihenfolge des Aufrufs der Module ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die einzelnen Module sind gemeinsam mit den Modulen von GIWACOM im Folgenden kurz charakterisiert:

readforces Liest die sich über den Modelllauf nicht verändernden treibenden Kräfte ein, nämlich den Priestley-Taylor-Feuchteindex und die Textur des Bodens. Diese Größen werden für die Bestimmung des Bodenwasserpotentials und die Steuerung der Stomata benötigt.

readgen Liest festgelegte Eigenschaften von Vegetationstypen oder von Gruppen von Vegetationstypen ein. Für CABIN sind hier nur die Vegetationstypen selber, die spezifische Blattfläche und die Referenztemperaturen von Bedeutung. Die restlichen Größen betreffen die Regulation der Stomata.

cleparams Setzt über den Modelllauf unveränderliche Parameter oder berechnet sie aus festen treibenden Kräften (siehe readforces). Die Parameter $k_{R \rightarrow As,0}$ und $k_{As \rightarrow R,0}$ des Speicherungsmodells (siehe Gleichungen 4.20 und 4.21) werden hier gesetzt.

initpools Bereitet den Modelllauf vor. Die Poolgrößen werden initialisiert (siehe Abschnitt 3.1.12.3) und Phytomassen und Stickstoffpools werden eingelesen. Letzteres wird bei zukünftiger Kopplung an NCIM entfallen und durch eine Übergabe der entsprechenden Daten aus NCIM ersetzt.

arcalc Berechnet die Grundflächen der Gitterelemente.

ipbioma Führt die tägliche Interpolation der Phytomassen durch.

readclim Liest Temperaturen, Niederschläge und Strahlungsdaten ein.

calpspar Berechnet die Werte von J_{max} und V_{cmax} bei Referenztemperatur (Gleichungen 2.6 und 2.7).

iptemp.rad Führt die minütliche lineare Interpolation der Strahlung und der Temperaturen zwischen den stündlichen Daten durch.

psir Berechnet das Bodenwasserpotential.

effclc Berechnet neben einigen Parametern für die Stomataregulation die temperaturabhängigen Parameter der Photosynthese. Außerdem werden die Speicherkapazitäten (Gleichungen 4.22 und 4.23) berechnet.

respiration Berechnet die Respiration.

photosynthesis Berechnet die Photosynthese.

allocation Berechnet den Grundumsatz und die zu allozierende Menge Kohlenstoff.

Weitere Module führen die Ausgabe der Ergebnisse durch.

Der Zeitverlauf ist programmiertechnisch über Schleifen realisiert, die Jahre, Tage, Stunden, Minuten und Sekunden repräsentieren. In der innersten Schleife (Sekunden) läuft der Runge-Kutta Integrator, der das Differentialgleichungssystem berechnet und die Modellsekunde in mehrere Teile teilt. In CABIN werden in der Regel drei Schritte pro Modellsekunde verwendet.

3.1.12.2 Rechenplattform

CABIN wurde wie GIWACOM in der Programmiersprache FORTRAN programmiert. Die in dieser Arbeit gezeigten Modellergebnisse entstammen Modellläufen, die auf dem Multiprozessorrechner „hydra“ des Hochschulrechenzentrums Gießen durchgeführt wurden. Es handelt sich um einen Parallelrechner der HPCLine der Firma Fujitsu-Siemens. Er enthält 16 Knoten mit jeweils 2 Pentium-III-Prozessoren mit einer Taktfrequenz von 450 oder 500 MHz. Es wurde jeweils auf 4 Rechenknoten (8 Prozessoren) des Rechners gerechnet. Auf jedem Prozessor wurde jeweils ein Achtel der Stationen gerechnet. Der verwendete Compiler auf hydra war PGF90 der Firma Portland.

Die Läufe zur Bedeutung der Stickstoffabhängigkeit von Photosynthese und Respiration (siehe Abschnitt 3.4.4.5) wurden auf verschiedenen leistungsstarken PCs mit Pentium IV oder AMD Opteron Prozessoren durchgeführt. Hier wurde der freie gnu FORTRAN 90 Compiler verwendet.

Die Läufe der Teilmodelle, Entwicklungsläufe und die Berechnung der Wetterdaten wurde auf einer Unix-Workstation vom Typ C360 des Herstellers HP durchgeführt. Hier wurde mit dem FORTAN-Compiler f90 von HP gearbeitet.

3.1.12.3 Initialisierung eines Modelllaufes

Die Initialisierung von CABIN erfolgt so, dass möglichst schnell ein steady state erreicht werden kann:

1. Die monatlichen Phytomassen und Stickstoffpools für alle Kompartimente werden eingelesen.
2. Die CO_2 -Konzentration der Außenluft c_a wird gesetzt.

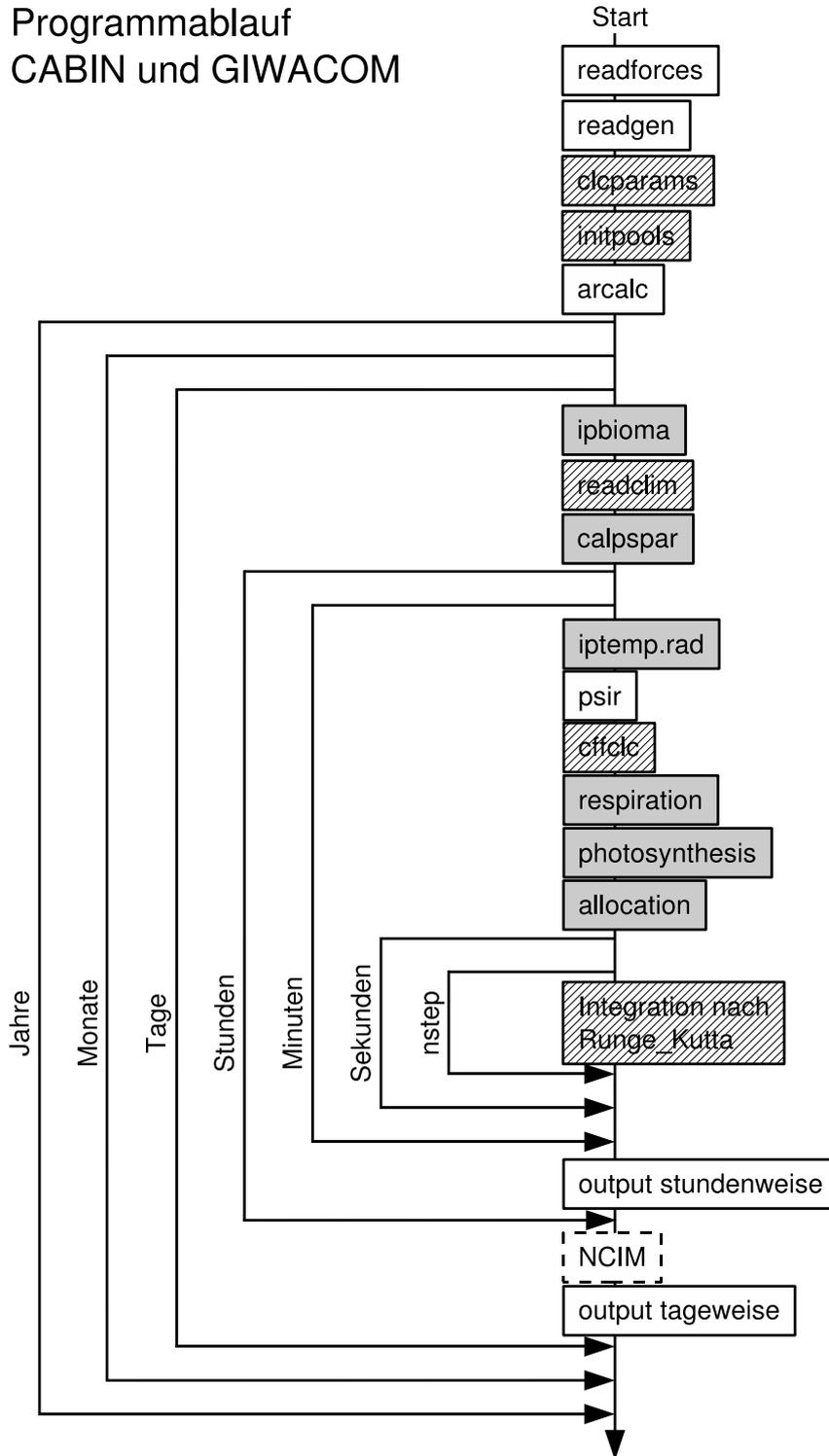


Abbildung 3.3: Zeitablauf und Rufreihenfolge der Subroutinen von CABIN und GIWACOM. Grau hinterlegte Kästchen zeigen Subroutinen, die ausschließlich zu CABIN gehören. Schraffierte Kästchen stehen für Subroutinen, in denen Code für CABIN und GIWACOM enthalten ist. Die Position im Programmablauf, in der NCIM aufzurufen wäre ist mit einem gestrichelten Kasten angegeben. Die Aufgaben der Programmteile sind im Text (Abschnitt 3.1.12.1) erklärt. Die Zeitangaben beziehen sich auf die jeweilige Schleife; nstep bezeichnet die Anzahl Durchläufe des Runge-Kutta Integrators pro Modellsekunde.

3. Die interzelluläre CO₂-Konzentration wird nach der Faustformel $c_i = \frac{2}{3}c_a$ initialisiert (vergl. Wong et al., 1978; Morison, 1987).
4. Der Startwert für die Stomataleitfähigkeit g_s wird auf $10 \mu\text{mol gDW}^{-1} \text{ s}^{-1}$ gesetzt, so dass die modellierten Stomata zum Modellstart um Mitternacht fast geschlossen sind.
5. Die Kapazitäten der Kohlenhydratpools werden initialisiert.
6. Der Assimilatpool wird mit $\frac{1}{30}$ der lebenden Phytomasse initialisiert, so dass der Pool bei geringster Kapazität (siehe Tabelle 3.7) etwa halb gefüllt ist^g.
7. Der Reservekohlenhydratpool wird über den Quotienten aus Speicherung- und Remobilisierungsparameter ins Gleichgewicht mit dem Assimilatpool gesetzt^g:

$$\frac{k_{As \rightarrow R}}{k_{R \rightarrow As}} \cdot Assim$$
8. Der laufende Mittelwert des Feuchteindex \overline{FI} (siehe Abschnitt 2.2.1) wird auf Basis eines Vorlaufes mit den letzten auftretenden Werten eines Jahres initialisiert.

3.2 Vergleichsdaten

Es wurden einige Orte zum Testen von CABIN ausgewählt, für die auf Messungen basierende NPP-Daten vorliegen. Die für diese Orte bestimmte NPP (in dieser Arbeit als *gemessene NPP* oder *NPP-Messdaten* bezeichnet) wird mit der von CABIN berechneten NPP (in dieser Arbeit als *modellerte NPP* oder *Modell-NPP* bezeichnet) verglichen.

Die Orte, von denen die NPP-Messdaten stammen, werden im Folgenden als *Stationen* oder zur deutlichen Unterscheidung von Wetterstationen als *NPP-Stationen* bezeichnet. Sie wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

1. Messdaten über die NPP müssen verfügbar sein. Datenquelle ist die NPP-Datenbank des Oak Ridge National Laboratory (Olson et al., 2001, ORNL, siehe). Sie wird in dieser Arbeit als *ORNL-Datenbank* bezeichnet.
2. Offizielle Wetterstationen der WMO, die Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung und möglichst auch Evaporation/Evapotranspiration mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens sechs Stunden aufzeichnen, müssen in der Nähe liegen. Bei der Auswahl der Wetterstationen wurde darauf geachtet, dass sie in der gleichen Klimazone und möglichst auf gleicher Höhe über dem Meeresspiegel liegen, wie die NPP-Stationen.
3. Die Stationen müssen in einem Gebiet liegen, das repräsentativ für den jeweiligen Vegetationstyp ist.

Um Gruppen von Stationen zur gemeinsamen Auswertung zu erhalten (siehe Abschnitt 3.4.4), wurden für diese Arbeit allgemeine Vegetationstypen gebildet. Die Vegetationstypen auf Basis der in NCIM und GIWACOM verwendeten Vegetationskarte nach Schmithüsen (1976) wurden zu allgemeineren Typen zusammengefasst.

^gDie Initialisierung des Kohlenhydratpools ist nicht zwingend notwendig. Sie wird vorgenommen, damit von Beginn des Modelllaufs an Respiration stattfinden kann. CABIN erreicht so schneller sein steady state.

Als allgemeine Vegetationstypen wurden Tundra, borealer Wald, temperierter Wald, Steppe/Prärie, mediterrane Vegetation, Savanne, Trockenwald, tropischer Regenwald und Wüste festgelegt. Für Tundra, Steppe/Prärie und mediterrane Vegetation konnte dennoch nur jeweils eine den aufgestellten Kriterien entsprechende Station gefunden werden.

Die ausgewählten Stationen sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Angaben zur NPP an den Stationen finden sich in Tabelle 4.6 auf Seite 82.

3.3 Eingabedaten

CABIN benötigt als Eingabedaten Stickstoffkonzentrationen und Phytomassen der verschiedenen Kompartimente, Niederschlag, Temperatur und Strahlung, Referenztemperaturen, den Blattflächenindex sowie die atmosphärische CO₂-Konzentration. Die für diese Arbeit verwendeten Daten werden in diesem Abschnitt mit den jeweiligen Datenquellen vorgestellt.

3.3.1 Phytomassen und Stickstoffmengen

Die in dieser Arbeit verwendeten Phytomassen wurden mit dem High Resolution Biosphere Model (HRBM, Esser et al., 1994) berechnet. Bei Vorversuchen zeigte sich, dass das HRBM für einige Vegetationstypen unrealistische Verhältnisse von krautiger zu holziger Phytomasse produziert, weswegen die in Tabelle 3.3 angegebenen Änderungen (Esser, pers. Mitt.) zur Berechnung der Phytomassen vorgenommen wurden.

Die verwendeten Phytomassendaten wurden ohne die Landwirtschafts- und Feuerroutinen des HRBM berechnet. Die CO₂-Konzentration war auf ca. 280 $\mu\text{l l}^{-1}$ gesetzt, was ungefähr der Konzentration um das Jahr 1860 entspricht. Als Klimadaten für das HRBM wurden bearbeitete Daten der Climatic Research Unit der University of East Anglia verwendet (Mitchell et al., 2004). Die Vegetation war entsprechend der Vegetationskarte von Schmithüsen (1976) gesetzt. Diese wurde in der Arbeitsgruppe für eine Auflösung von 0,5° (geographische Länge mal Breite) digitalisiert.

Zu den so erhaltenen Kohlenstoffphytomassen wurden die entsprechenden Stickstoffpools über festgelegte Standard-C:N-Verhältnisse aus NCIM (Esser, 2007) berechnet. NCIM unterscheidet bei den C:N-Verhältnissen zwischen holzigen und krautigen Kompartimenten. In NCIM werden für holzige wie für krautige Kompartimente ober- und unterirdisch gleiche Werte angenommen.

Das HRBM arbeitet mit einem monatlichen Zeitschritt. Um CABIN, welches mit einem viel kürzeren Zeitschritt rechnet, nicht durch die plötzlichen Sprünge der Phytomassen zum Monatswechsel instabil zu machen, werden die Phytomassen zwischen den monatlichen Werten linear interpoliert und täglich neu gesetzt.

Tabelle 3.2: Liste der NPP-Messorte (Stationen), an denen die in dieser Arbeit verwendeten Vergleichsdaten aufgenommen wurden. Angegeben ist der Vegetationstyp, dem die Station in dieser Arbeit zugewiesen wurde, die ID der Station in der ORNL-Datenbank (Olson et al., 2001), der Ortsname der Station oder die in der Literatur verwendete Bezeichnung, der Staat, in dem die Station liegt, die geographischen Koordinaten der Station und deren Höhe über dem Meeresspiegel, die Vegetation an der Station, wie sie in der Originalliteratur und bei Schmithüsen (1976, mit S markiert) angegeben ist, sowie die verwendete Primärliteratur. Fehlt dort die Angabe war keine Primärliteratur zugänglich und alle Angaben wurden der ORNL-Datenbank entnommen.

Vegetationstyp	ID	Name (Staat)	geogr. Lage	Vegetation	Literatur
Tundra	1594	Umiat (USA, Alaska)	69°22'N 151°55'W 196 m	Wollgrastundra S: Zwergstrauchtundra	Wein und Bliss (1974)
Borealer Wald	1552	Juupajoki (Finnland)	61°40'N 24°19'E 103 m	<i>Pinus sylvestris</i> Bestand S: Borealer immergrüner Nadelwald	Mälkönen (1975)
Borealer Wald	1556	Jaakkoinso/ Vilppula (Finnland)	62°4'N 23°34'E 111 m	Zwergstrauch-Kiefern Sumpf S: Borealer immergrüner Nadelwald	Paavilainen (1980)
Borealer Wald	1567	Bonanza Creek experimental forest (USA, Alaska)	64°45'N 148°15'W 150 m	<i>Picea mariana</i> Bestand S: Borealer immergrüner Nadelwald mit sommergrünem Laubholz	Van Cleve et al. (1971), Van Cleve et al. (1981)
Temperierter Wald	1009	Hubbard Brook Forest (USA, New Hampshire)	44°W 71°30'N 550 m	mesophytischer Laub abwerfender Wald S: Montaner sommergrüner Laubwald mit Nadelholz	Whittaker (1966), Whittaker et al. (1974), Whittaker und Niering (1975)
Temperierter Wald	991	Hubbard Brook Forest (USA, New Hampshire)	43°55'N 71°40'N 357 m	secondary northern hardwood forest with patches of spruce-fir S: Sommergrüner Laubwald mit immergrünem Nadelholz	Bormann et al. (1970)
Temperierter Wald	709	(USA, Tennessee)	36°N 87°W 217 m	S: Sommergrüner mesophytischer Laubwald	—
Temperierter Wald	1377	Solling (Deutschland)	51°49'N 9°35'E 292 m	Luzulu-Fagetum (<i>Picea</i>) S: Sommergrüner mesophytischer Laubwald	Lieth (1978), Runge (1973), Ellenberg (1971)
Temperierter Wald	1379	Solling (Deutschland)	51°47'N 9°40'E 355 m	Luzulu-Fagetum (<i>Fagus</i>) S: Sommergrüner mesophytischer Laubwald	Lieth (1978), Runge (1973), Ellenberg (1971)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung Tabelle 3.2

Vegetationstyp	ID	Name (Staat)	geogr. Lage	Vegetation	Literatur
Temperierter Wald	1184	Sikfokat (Ungarn)	47°54'N 20°28'O 171 m	Eichenwald (Quercetum Petraeae-Cerris) S: Sommergrüner mesophytischer Laubwald	DeAngelis et al. (1981)
Temperierter Wald	773	(Japan)	37°30'N 139°O 227 m	<i>Fagus crenata</i> S: sommergrüner mesophytischer Laubwald	Tadaki et al. (1969)
Steppe, Prärie	808	Hays (USA, Kansas)	38°52'N 99°23'W 21 m	mixed-grass Prärie S: mixed-grass Prärie	Sims et al. (1978), Sims und Singh (1978a), Sims und Singh (1978b)
Mediterrane Vegetation	779	IBP Phrygana research site (Griechenland)	37°58'N 23°43'E 209 m	Phrygana S: Regengrüne und teilimmergrüne Dornstrauchformation	Margaris (1976)
Savanne	105	Centre de Recherches Zootechniques de Dahra (Senegal)	15°20'N 15°35'W 55 m	„grassland“ S: Dornsavanne	Cornet und Poupon (1977), Cornet (1981a), Cornet (1981b)
Savanne	106	Centre de Recherches Zootechniques de Dahra (Senegal)	15°20'N 15°33'W 53 m	grassland S: Dornsavanne	Cornet und Poupon (1977), Cornet (1981a), Cornet (1981b)
Savanne	164	Parsad (Indien)	24°11'N 73°40'O 806 m	Savanne S: Dornsavanne	Rodin und Bazilevich (1967)
Savanne	271	(Indien)	26°17'N 73°5'O 221 m	S: Offene regengrüne kleinblättrige Dornbaumsavanne	—
Trockenwald	23	(Kongo)	11°29'S 27°36'W 1208 m	Miombo Gehölz S: Tropischer regengrüner Trockenwald mit immergrünem Unterholz	DeAngelis et al. (1981)
Tropischer Regenwald	56	Bannadpare (Indien)	12°5'N 75°42'O 200 m	Tropischer Feuchtwald S: Tropischer immergrüner Tieflandsregenwald	Clark et al. (2001b), Clark et al. (2001a)
Tropischer Regenwald	80	Khao Chong (Thailand)	7°35'N 99°48'O 206 m	Tropischer saisonaler immergrüner Regenwald S: Tropischer immergrüner Tieflandsregenwald	Kira und Shidei (1967), Kira et al. (1967)

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung Tabelle 3.2

Vegetationstyp	ID	Name (Staat)	geogr. Lage	Vegetation	Literatur
Tropischer Regenwald	66	Pasoh (Malaysia)	2°59'N 102°18'O 188 m	Tropischer Tieflandsregenwald S: Tropischer immergrüner Tieflandsregenwald	Gong (1982), Kira (1978), Kira (1977), Ogawa (1978), Richards (1978), Soepadmo (1978)
Tropischer Regenwald	65	Pasoh (Malaysia)	2°59'N 102°18'O 188 m	Gemischter Tieflandsregenwald (Shorea-Dipterocarpus Typ) S: Tropischer immergrüner Tieflandsregenwald	Gong (1982), Kira (1978), Kira (1977), Ogawa (1978), Richards (1978), Soepadmo (1978)
Wüste	634	(Syrien)	34°30'N 41°5'O 222 m	S: Tropisch-subtropische Zwergstrauch-Halbwüste	—
Wüste	737	Nevada Test Site (USA, Nevada)	36°40'N 116°W 1239 m	S: Xeromorphe Strauchformation	—
Wüste	885	(USA, Utah)	41°5'N 113°5'W 1416 m	Wüstengesellschaft dominiert von <i>Ceratoides lanata</i> und <i>Atriplex confertifolia</i> S: Halophyten-Wüste	Caldwell (1974), Caldwell und Camp (1974)

Tabelle 3.3: Die mit CABIN verwendeten Phytomassedaten wurden mit dem High Resolution Biosphere Model (HRBM, Esser et al., 1994) ermittelt. Die Tabelle zeigt von der Modellbeschreibung des HRBM abweichende Parameter. Es ist jeweils der bisherige und der neue Wert angegeben. Symbole: age_w – mittleres Bestandesalter der holzigen Kompartimente; $herb$ – Anteil der NPP, der auf die krautigen Kompartimente verteilt wird.

Vegetationstyp	Parameter			
	age_w		$herb$	
	bisher	neu	bisher	neu
Tropische Tieflands-Regenwälder	200	150	0,37	0,44
Tropische Bergwälder	—	—	0,37	0,44
Subtropische immergrüne Wälder	200	150	0,37	0,44
Subtropische Laub abwerfende Wälder	150	110	—	—
Temperierte Laub abwerfende Wälder	150	130	—	—

3.3.2 Referenztemperatur

Die Referenztemperatur T_{Ref} wird aus GIWACOM übernommen. Sie ist dort den Vegetationstypen (Schmithüsen, 1976) zugeordnet und wurden anhand durchschnittlicher Temperaturen der wärmsten Monate der Vegetationsperiode gesetzt (Esser, persönliche Mitteilung).

3.3.3 Atmosphärische CO₂-Konzentration

Die atmosphärischen CO₂-Konzentration c_a wurde auf 370 $\mu\text{l l}^{-1}$ gesetzt.

3.3.4 Wetterdaten

Um CABIN und GIWACOM zu betreiben und die modellierte NPP mit gemessenen Werten vergleichen zu können, werden zeitlich hoch aufgelöste Daten über das Wetter an den NPP-Stationen gebraucht. Da Daten über das im Jahr und am Ort der NPP-Messungen herrschende Wetter nur selten zugänglich sind, wurde bei der Auswahl der zu verwendenden NPP-Stationen darauf geachtet, dass Wetterstationen in der Nähe liegen (siehe Kriterium 2 in Abschnitt 3.2). Aus den gemessenen Wetterdaten wurden Datensätze für ein repräsentatives Jahr hergeleitet. Sie sollen das durchschnittliche Wetter repräsentieren, ohne dessen zeitlichen Verlauf zu stark zu glätten, wodurch die natürliche auftretenden Extrema vernachlässigt würden.

Gemessene Wetterdaten werden von den Stationen der WMO zwar in hoher zeitlicher Auflösung erhoben, waren aber meist nicht erhältlich. Außerdem entsprechen die Stationen, von denen Messdaten zu bekommen sind, oft nicht den in Abschnitt 3.2 aufgestellten Kriterien. Daher wurden für diese Arbeit Methoden entwickelt, um geeignete Wetterdaten aus den erhältlichen herzuleiten.

Im Folgenden werden die erhältlichen Daten und die Prinzipien ihrer Aufbereitung zur Nutzung in CABIN kurz vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden und Daten findet sich in Anhang C.

3.3.4.1 Strahlung

Aufgrund der teils erheblichen Entfernungen zwischen NPP-Stationen und Wetterstationen kann die gemessene Strahlung nicht einfach als an beiden Orten identisch angenommen werden. Statt dessen wird angenommen, dass an beiden Orten der selbe Anteil der potentiell möglichen Strahlung die Vegetation erreicht.

Die verwendeten Messdaten der Globalstrahlung stammen vom Baseline Service Radiation Network (BSRN) und dem World Radiation Data Center der WMO (WRDC), wobei erstere in einer zeitlichen Auflösung von unter einer Stunde, letztere aber nur in täglicher Auflösung erhältlich sind. In beiden Fällen liegen die Daten für mehrere Jahre vor (siehe Tabelle C.1 in Anhang C). Die Zuordnung von Wetter zu den NPP-Stationen ist in Tabelle 3.4 angegeben.

Um einen repräsentativen Jahresdatensatz zu erzeugen und die natürlichen Extrema der Strahlung nicht zu glätten, wurde für jeden Kalendertag aus den Jahren, für die für den Tag gültige Daten existieren, zufällig ein Jahr ausgewählt. Aus diesem Jahr wurden die Daten für den jeweiligen Tag in den zu erzeugenden Datensatz eingesetzt.

In einem zweiten Schritt wurde für jeden Tag ein Tagesgang mit stündlichen Daten erzeugt. Für die zeitlich hochaufgelösten BSRN-Strahlungsdaten wurden die Werte auf eine Stunde aggregiert.

Für die WRDC-Daten wurde ein Vorlagedatensatz mit stündlichen Daten auf der Basis von Modellergebnissen des International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP, Stackhouse et al., 2000, 2004) erzeugt. Der Tagesgang dieses Vorlagedatensatzes wurde auf die gemessene tägliche Strahlungssumme projiziert und diese so auf die Stunden des Tages verteilt.

Im dritten Schritt wurden der Quotient zwischen den auf diese Weise erzeugten stündlichen Strahlungsdaten für die Wetterstation und der (berechneten) potentiellen Strahlung bestimmt. Dieser Quotient wurde dann im letzten Schritt auf die stündliche potentielle Strahlung an der NPP-Station übertragen.

Die genaue Vorgehensweise zur Herleitung der Strahlungsdaten ist im Anhang C in Abschnitt C.1 gezeigt.

3.3.4.2 Niederschläge

Niederschlagsdaten werden benötigt, um das Bodenwassermodell (siehe Abschnitt 2.2.1) anzutreiben. Da dort ein langfristiger laufender Mittelwert des Feuchteindex berechnet wird (Gleichung 2.2), ist es nicht notwendig, wie bei den Strahlungsdaten Extremereignisse zu erhalten. Dennoch werden die Niederschlagswerte stündlich bestimmt, um Wetterdaten im Modell im gleichen Rhythmus einlesen zu können. Es wird angenommen, dass sich die Niederschläge zwischen der NPP- und der Wetterstation nicht unterscheiden.

Quelle der täglichen Niederschlagssummen ist eine Datensammlung, die vom Agricultural Research Service des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums erhältlich ist (<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=9709&page=1>, Stand 17.04.2006). Daten aus anderen Quellen wurden nur verwendet, wenn in dieser Datensammlung keine geeigneten Wetterstationen enthalten sind. Eine Liste der verwendeten Wetterstationen ist in Tabelle 3.5 gezeigt.

Wo tägliche Messdaten zugänglich waren, wurde für jeden Kalendertag aus den gemessenen Tagessummen aller Jahre mit gültigen Daten eine mittlere Tagesnieder-

Tabelle 3.4: NPP-Stationen und Wetterstationen, deren Messdaten zur Herleitung der Strahlungsdaten verwendet wurden. Zu jeder Wetterstation ist deren Kennung angegeben. Besteht diese aus Ziffern, stammen die Strahlungsdaten vom World Radiation Data Center (WRDC), besteht sie aus Buchstaben, stammen die Daten von Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Station (Vegetation)	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN	Wetterstation (Kennung)	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN
1594 (Tu)	69,37	-151,92	196	Point Barrow (BAR)	71,32	-156,60	0
1552 (Bo)	61,67	24,32	103	Jokioinen (029630)	60,82	23,50	104
1556 (Bo)	61,67	24,32	103	Jokioinen (029630)	60,82	23,50	104
1567 (Bo)	64,75	-148,25	150	Fairbanks (702610)	64,82	-146,13	132
1009 (Te)	44,00	-71,50	550	Burlington (726170)	44,47	-72,85	102
991 (Te)	44,00	-71,50	550	Burlington (726170)	44,47	-72,85	102
709 (Te)	36,00	-87,00	217	Nashville/Metropolitan (723270)	36,12	-85,32	180
1379 (Te)	51,82	9,58	292	Kassel (104380)	51,30	9,45	231
1377 (Te)	51,82	9,58	292	Kassel (104380)	51,30	9,45	231
1184 (Te)	47,90	20,47	171	Tiszaors (128821)	47,45	20,83	91
773 (Te)	37,50	139,00	227	Wajima (476000)	37,38	136,90	5
808 (St)	38,87	-99,38	621	Dodge City (724510)	37,77	-98,03	791
779 (Me)	37,91	23,72	209	Athens Obs, (167140)	37,97	23,72	107
105 (Sa)	15,33	-15,58	55	Louga (616121)	15,62	-15,78	38
106 (Sa)	15,33	-15,58	55	Louga (616121)	15,62	-15,78	38
164 (Sa)	24,18	73,67	806	Ahmadabad (426470)	23,07	72,62	55
271 (Sa)	26,28	73,08	221	Jodhpur (423390)	26,30	73,02	217
23 (DF)	-11,48	27,60	1208	Lubumbashi/Karavia (643700)	-10,35	27,47	1260
56 (Tr)	12,08	75,70	200	Goa/Panjim (431920)	15,48	73,82	58
80 (Tr)	7,58	99,80	206	Pinang/Bayan Lepas (486010)	5,30	100,27	3
66 (Tr)	2,98	102,30	188	Kuala Lumpur/Subang (486470)	3,12	101,55	27
65 (Tr)	2,98	102,30	188	Kuala Lumpur/Subang (486470)	3,12	101,55	27
634 (Dr)	34,50	41,08	222	Raqqa (400390)	35,93	39,02	245
737 (Dr)	36,67	-116,00	1239	Desert Rock SURFRAD, PA (DRA)	36,65	-116,02	0
885 (Dr)	41,08	-113,08	1416	Ely/Yelland (724860)	39,28	-113,15	1907

Tabelle 3.5: NPP-Stationen und Wetterstationen, deren Messdaten zur Herleitung der Niederschlagsdaten verwendet wurden. Zu den Wetterstationen ist wo vorhanden deren von der WMO vergebene Kennung angegeben. Datenquellen: GDS – GDS-Datensatz (siehe Abschnitt C.2); ORNL – monatliche Daten aus der ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2); Ziffern bezeichnen die entsprechenden Fußnoten. Zeitliche Auflösung: d – täglich; m – monatlich. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Station (Vegetation)	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN	Wetterstation (Kennung)	Daten- quelle	zeitliche Auflösung	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN
1594 (Tu)	69,37	-151,92	196	Umiat (509539)	(1)	d	69,37	-152,14	104
1552 (Bo)	61,67	24,32	103	Kuorevesi (02945)	GDS	d	61,85	24,80	143
1556 (Bo)	61,67	24,32	103	Kuorevesi (02945)	GDS	d	61,85	24,80	143
1567 (Bo)	64,75	-148,25	150	Fairbanks WSFO AP AK (502968)	GDS	d	64,82	-147,87	44
1009 (Te)	44,00	-71,50	550	Plymouth 2 (276945)	GDS	d	43,77	-71,67	201
991 (Te)	44,00	-71,50	550	Plymouth 2 (276945)	GDS	d	43,77	-71,67	201
709 (Te)	36,00	-87,00	217	Franklin (403280)	(2)	d	35,95	-86,87	200
1379 (Te)	51,82	9,58	292	Solling_1379	ORNL	m	51,82	9,58	292
1377 (Te)	51,82	9,58	292	Solling_1377	ORNL	m	51,78	9,67	355
1184 (Te)	47,90	20,47	171	Miskolc (12772)	GDS	d	48,13	20,80	233
773 (Te)	37,50	139,00	227	Niigata (47604)	GDS	d	37,92	139,05	2
808 (St)	38,87	-99,38	621	Hays 1 S KS (143527)	GDS	d	38,87	-99,33	200
779 (Me)	37,91	23,72	209	Athenai/Hellenikon (16716)	GDS	d	37,90	23,73	9
105 (Sa)	15,33	-15,58	55	Louga (61600)	(3)	m	15,62	16,22	38
106 (Sa)	15,33	-15,58	55	Louga (61600)	(3)	m	15,62	16,22	38
164 (Sa)	24,18	73,67	806	Ahmedabad (42647)	GDS	d	23,07	72,63	55
271 (Sa)	26,28	73,08	221	Jodhpur (42339)	(4)	m	26,30	27,02	238
23 (DF)	-11,48	27,60	1208	Lubumbashi (64360)	(4)	m	11,65	27,47	1290
56 (Tr)	12,08	75,70	200	Mangalore/Bajpe (43284)	GDS	d	12,92	74,88	90
80 (Tr)	7,58	99,80	206	Trang (48567)	GDS	d	7,52	99,63	14
66 (Tr)	2,98	102,30	188	Pasoh (5)	(5)	m	2,59	10,21	80
65 (Tr)	2,98	102,30	188	Pasoh (5)	(5)	m	2,59	10,21	80
634 (Dr)	34,50	41,08	222	Abu Kamal (40072)	GDS	d	34,42	40,92	180
737 (Dr)	36,67	-116,00	1239	Desert Rock WMSO (262251)	GDS	d	36,62	-116,02	1006
885 (Dr)	41,08	-113,08	1416	Lucin UT (425239)	GDS	d	41,35	-113,90	447

(1) von <http://www.wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMAIN.pl?akumia> (Stand 19.08.2005)

(2) von <http://cirrus.dnr.state.sc.us/cgi-bin/sercc/cliMAIN.pl?tn3280> (Stand 19.08.2005)

(3) von <http://climexp.knmi.nl> (Stand 19.08.2005)

(4) aus Müller (1982)

(5) aus Kira (1977)

schlagssumme berechnet. Die Verteilung auf die Stunden eines Tages erfolgte mit Hilfe eines stündlich aufgelösten Vorlagedatensatzes (ISLSCP, Stackhouse et al., 2000, 2004) analog zur für die Strahlung verwendeten Methode. Wo nur Monatssummen der Niederschläge erhältlich waren, wurden diese anhand des Vorlagedatensatzes auf die Stunden des Monats verteilt.

Die genaue Vorgehensweise zur Herleitung der Niederschlagsdaten ist im Anhang C in Abschnitt C.2 gezeigt.

3.3.4.3 Temperatur

Bei der Herleitung stündlicher Temperaturdaten wurde angenommen, dass sich die Temperaturen an NPP- und Wetterstation gleichen. Bei Bedarf wurde eine Höhenkorrektur vorgenommen (siehe Abschnitt C.3.4 in Anhang C).

Die verwendeten Messdaten stammen aus der selben Quelle, wie die Niederschlagsdaten (Abschnitt 3.3.4.2). Sie liegen als tägliche Minimums- und Maximumtemperaturen vor. Eine Liste der verwendeten Wetterstationen findet sich in Tabelle 3.6.

Wo tägliche Messdaten zugänglich waren, wurden für jeden Kalendertag Mittelwerte der gemessenen Tagesminima und -maxima aller Jahre mit für den jeweiligen Tag gültigen Daten berechnet. Um Temperaturen für jede Stunde eines Tages zu bekommen, wurde wie bei den anderen Klimagrößen ein stündlich aufgelöster Vorlagedatensatz (ISLSCP, Stackhouse et al., 2000, 2004) verwendet. Aus dieser Vorlage wurde für jeden Kalendertag die Temperaturextrema und die Stunden, in denen diese auftreten, ermittelt. Die dazwischen liegenden Temperaturen der restlichen Stunden des Tages wurden als relative Werte innerhalb der Tagestemperaturspanne dargestellt. Diese relativen Temperaturwerte wurden anschließend auf die Spanne zwischen den gemessenen Tagestemperaturextrema angewandt, um die stündlichen Temperaturen für den zu erstellenden repräsentativen Temperaturdatensatz zu bestimmen.

Wo keine täglichen Temperaturextrema zugänglich waren, wurden zwischen mittleren monatlichen Tagestemperaturextrema interpoliert, um tägliche Minima und Maxima der Temperaturen zu erhalten. Die Stundenwerte wurden dann wie oben beschrieben anhand des Vorlagedatensatzes bestimmt.

Die genaue Vorgehensweise zur Herleitung der Temperaturdaten ist im Anhang C in Abschnitt C.3 gezeigt.

3.3.4.4 Durchführung

Für die Berechnung der Wetterdaten wurden Programme in FORTRAN entwickelt, die nach Auswahl der zu verwendenden Wetterstation alle Berechnungen automatisch durchführen.

3.3.4.5 Prüfen der Wetterdaten

Die Wetterdaten wurden graphisch und durch Mittelwertbildung mit den Ursprungsdaten der Messstationen, mit Daten aus Müller (1982) und den Standardklimadaten von Leemans und Cramer (1991) verglichen. Die Abbildungen und Tabellen dazu sind im Anhang C im Abschnitt C.4 gezeigt.

Tabelle 3.6: NPP-Stationen und Wetterstationen, deren Messdaten zur Herleitung der Temperaturdaten verwendet wurden. Zu jeder Wetterstation ist deren von der WMO vergebene Kennung angegeben. Datenquellen: GDS – GDS-Datensatz (siehe Abschnitt C.2); ORNL – monatliche Daten aus der ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2); Ziffern bezeichnen die entsprechenden Fußnoten. Zeitliche Auflösung: d – täglich; m – monatlich. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Station (Vegetation)	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN	Wetterstation (Kennung)	Daten- quelle	zeitliche Auflösung	geogr. Länge	geogr. Breite	Höhe über NN
1594 (Tu)	69,37	-151,92	196	Umiat (509539)	(1)	d	69,37	-152,14	104
1552 (Bo)	61,67	24,32	103	Kuorevesi (02945)	GDS	d	61,85	24,80	143
1556 (Bo)	61,67	24,32	103	Kuorevesi (02945)	GDS	d	61,85	24,80	143
1567 (Bo)	64,75	-148,25	150	Fairbanks WSFO AP AK (502968)	GDS	d	64,82	-147,87	44
1009 (Te)	44,00	-71,50	550	Plymouth 2 (276945)	GDS	d	43,77	-71,67	201
991 (Te)	44,00	-71,50	550	Plymouth 2 (276945)	GDS	d	43,77	-71,67	201
709 (Te)	36,00	-87,00	217	Franklin (403280)	(2)	d	35,95	-86,87	200
1379 (Te)	51,82	9,58	292	Solling_1379	ORNL	m	51,82	9,58	292
1377 (Te)	51,82	9,58	292	Solling_1377	ORNL	m	51,78	9,67	355
1184 (Te)	47,90	20,47	171	Miskolc (12772)	GDS	d	48,13	20,80	233
773 (Te)	37,50	139,00	227	Niigata (47604)	GDS	d	37,92	139,05	2
808 (St)	38,87	-99,38	621	Hays 1 S KS (143527)	GDS	d	38,87	-99,33	200
779 (Me)	37,91	23,72	209	Athenai/Hellenikon (16716)	GDS	d	37,90	23,73	9
105 (Sa)	15,33	-15,58	55	Rosso (61489)	GDS	d	16,50	-15,82	6
106 (Sa)	15,33	-15,58	55	Rosso (61489)	GDS	d	16,50	-15,82	6
164 (Sa)	24,18	73,67	806	Ahmedabad (42647)	GDS	d	23,07	72,63	55
271 (Sa)	26,28	73,08	221	Jodhpur (42339)	GDS	d	26,30	27,02	238
23 (DF)	-11,48	27,60	1208	Lubumbashi (64360)	(3)	m	11,65	27,47	1290
56 (Tr)	12,08	75,70	200	Mangalore/Bajpe (43284)	GDS	d	12,92	74,88	90
80 (Tr)	7,58	99,80	206	Trang (48567)	GDS	d	7,52	99,63	14
66 (Tr)	2,98	102,30	188	Malacca (48665)	(3)	m	20,20	102,27	45
65 (Tr)	2,98	102,30	188	Malacca (48665)	(3)	m	20,20	102,27	45
634 (Dr)	34,50	41,08	222	Abu Kamal (40072)	GDS	d	34,42	40,92	180
737 (Dr)	36,67	-116,00	1239	Desert Rock WMSO (262251)	GDS	d	36,62	-116,02	1006
885 (Dr)	41,08	-113,08	1416	Lucin UT (425239)	GDS	d	41,35	-113,90	447

(1) von <http://www.wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMAIN.pl?akumia> (Stand 19.08.2005)

(2) von <http://cirrus.dnr.state.sc.us/cgi-bin/sercc/cliMAIN.pl?tn3280> (Stand 19.08.2005)

(3) aus Müller (1982)

3.4 Vorgehensweise

In diesem Abschnitt wird zunächst die Vorgehensweise bei der Prüfung der Teilmodelle (Abschnitt 3.4.1) beschrieben. Anschließend werden Informationen über die Anwendung von CABIN an den NPP-Stationen (Abschnitt 3.4.2) gegeben. Es folgt eine Darstellung der Vorgehensweise bei der Betrachtung des gesamten Modells CABIN (Abschnitt 3.4.3). Abschließend wird die Vorgehensweise bei der Untersuchung der Bedeutung wichtiger Parameter von CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels (Abschnitt 3.4.4) vorgestellt.

3.4.1 Prüfung der Teilmodelle

3.4.1.1 Photosynthesemodell

Für das Photosynthesemodell (siehe Abschnitte 2.3 und 4.1.1) wurde geprüft, inwiefern es die von Kattge (2002) gemessenen Werte reproduzieren kann. Das in CABIN verwendete Photosynthesemodell von Kull und Kruijt (1998) sollte auf Blattebene keine deutlich von dem Modell von Farquhar et al. (1980) abweichende Ergebnisse zeigen, da es auf diesem basiert. Um dies zu prüfen wurde auch das Photosynthesemodell von Farquhar et al. (1980) mit den gemessenen Werten verglichen.

Die Messdaten von Kattge sind netto Photosynthesedaten, enthalten also auch den Einfluss der Respiration. Diese musste berechnet und von der modellierten Photosynthese subtrahiert werden, um Vergleichbarkeit von Modell und Messung herzustellen. Hierzu wurde ein von Kattge aufgestellter Zusammenhang zwischen Respiration R ($\mu\text{mol gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$) und der maximalen Carboxylierungsrate der Rubisco V_{cmax} (siehe Abschnitt 2.3.1) verwendet, der auf Ergebnissen der selben Messreihen basiert (Kattge, persönliche Mitteilung):

$$R = 0,02 \cdot V_{cmax} \quad (3.6)$$

Bei der Berechnung der brutto Photosynthese wurden in beide Photosynthesemodelle Messdaten des Trockengewichts, des Stickstoffgehalts, der Lufttemperatur in der Messküvette, der spezifischen Blattfläche und der interzellularen CO_2 -Konzentration eingespeist. Diese Daten wurden von Kattge zusammen mit der Photosynthesemessung aufgenommen. Die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese wurde in beiden Modellen wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben behandelt. Die Parameter k_c , k_o , Γ_* , H_a und H_d (siehe Abschnitt 2.3), die in beiden Modellen enthalten sind, wurden jeweils auf den selben Wert gesetzt.

Für beide Photosynthesemodelle wurden die Größen zur Bewertung von Modellläufen (siehe Anhang E) berechnet. Diese wurden zwischen den Modellen verglichen.

3.4.1.2 Respirationsmodell

Bei der Parametrisierung des Respirationsmodells (siehe Abschnitte 3.1.6 und 4.1.2) wird der Wert für den Parameter z (Gleichung 4.4) bestimmt, indem verschiedene Werte eingesetzt werden und derjenige ausgewählt wird, der zum höchsten Korrelationskoeffizienten bei der Reproduktion gemessener Respirationsdaten führt (Abschnitt 4.1.2.4). Um diese Vorgehensweise zu prüfen wurden für verschiedene Werte von z der mittlere relative Fehler, die mittleren Abstandsquadrate und Willmotts

Übereinstimmungsindex berechnet (siehe Anhang E). Auf Basis dieser Größen wurde geprüft, ob sich der nach der angewandten Parametrisierungsmethode ergebende Wert von z bestätigen lässt.

Zusätzlich wurde für das Respirationsmodell geprüft, inwieweit es die von Kattge (2002) gemessenen Respirationsdaten reproduzieren kann. In das Respirationsmodell wurde zu diesem Zweck gemessene Werte des Stickstoffgehalts, des Trockengewichts und der Temperatur in der Messküvette eingesetzt. Die eingesetzte Assimilatkonzentration wurde wie in Abschnitt 3.1.6.3 (Teil „Parametrisierung“) beschrieben bestimmt. Die resultierende modellierte Respiration wurden graphisch gegen die gemessene aufgetragen und der Korrelationskoeffizient wurde berechnet.

3.4.1.3 Lebendes Gewebe im Holz

Um den vom CABIN bestimmten Anteil lebenden Gewebes an der Holzphytomasse zu prüfen, wurde mit dem einzigen vorliegenden Datensatz verglichen, der das lebende Gewebe als Massenanteil am Holz angibt. Diese Daten wurden von Brosch (1990) an *Fraxinus excelsior* L. auf einer Ruderalfläche erhoben. Sie wurden an Stämmen und Ästen mit Durchmessern zwischen 1,8 und 10,6 cm im Alter zwischen 9 und 21 Jahren gemessen. In der Arbeit von Brosch wurden die untersuchten Stämme und Äste in zwei Durchmesserklassen ($10,9 \pm 0,5$ cm und $4,7 \pm 1,1$ cm) eingeteilt. Für die Klasse der dickeren Stämme und Äste ergab sich ein Massenanteil von 28,0 % ($279,98 \text{ mg gDW}^{-1}$), für die dünneren lag der Massenanteil bei 27,5 % ($275,19 \text{ mg gDW}^{-1}$). Nach Brosch (1990) hat also die Stammdicke keinen deutlichen Einfluss auf den Anteil lebenden Gewebes im Holz.

Zum Vergleich wurden mit dem Verfahren aus dem Respirationsmodell (Gleichung 4.14) lebende Phytomassen berechnet. Zugrunde gelegt wurden von HRBM berechnete Phytomassen (siehe Abschnitt 3.3.1) für das Gitterelement, in dem der Ort liegt, an dem die Vergleichsdaten erhoben wurden (Messort Osnabrück, Koordinate der Südwestecke des Gitterelementes 52°N , 8°O). Nach Schmithüsen (1976) herrscht dort der Vegetationstyp „Sommergrüner mesophytischer Laubwald“ vor.

3.4.2 Anwendung von CABIN an den NPP-Stationen

CABIN arbeitet wie GIWACOM und NCIM auf einem globalen Gitter in der Auflösung $0,5 \times 0,5$ Grad geographischer Breite mal Länge. Für diese Arbeit wurde CABIN nur für diejenigen Gitterelemente ausgeführt, in denen die 25 NPP-Stationen liegen (Abschnitt 3.2). Die Nummern der Gitterelemente können Tabelle F.1 in Anhang F entnommen werden.

Ein Problem ergab sich mit der mediterranen Station 779, die in einem Gitterelement liegt, das als Wasser definiert ist (Koordinaten der südwestlichen Ecke $37,5^\circ\text{N}$, $23,5^\circ\text{O}$). Für diese Station musste ein geeignetes Ersatzgitterelement mit einer zum in der Originalliteratur angegebenen Vegetationstyp Phrygana passenden Vegetation gefunden werden. Alle Nachbargitterelemente des betroffenen Gitterelements, die als Land definiert sind, haben nach Schmithüsen den Vegetationstyp „Sklerophyller Wald mit Olea“ und sind daher nicht als Ersatz geeignet. Gitterelemente mit den passendsten Vegetationstypen „Immergrüne skleromorphe Strauchformation“ und „Sklerophylle Garigue“ sind in der digitalisierten Vegetationskarte nach Schmithüsen im Mittelmeerraum nicht vertreten.

Es wurde daher Gitterelement 33804 (Koordinaten der südwestlichen Ecke

37,5°N, 9,5°O) ausgewählt, das nach Schmithüsen den Vegetationstyp „Regengrüne und teilimmergrüne Dornstrauchformation“ hat. Die zum Antrieb von CABIN verwendete Wetterdaten (siehe Abschnitt 3.3.4) wurden jedoch für den Ort der Station bestimmt.

Ein weiteres Problem trat für Station 808 (Steppe, Prärie) auf. CABIN ist hier mit den ansonsten durchgeführten drei Zeitschritten pro Modellsekunde (vergl. Abschnitt 3.1.12.1) instabil. Für Station 808 wurden daher vier Zeitschritte pro Modellsekunde gerechnet.

Als Eingabedaten für CABIN wurden durchgängig die in Abschnitt 3.3 angegebenen Daten verwendet.

3.4.3 Prüfung von CABIN

Dieser Abschnitt beinhaltet die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Betrachtung einiger wichtiger Teilergebnisse. Außerdem wird das Vorgehen bei der Prüfung der Reproduktion der gemessenen NPP-Daten und der Untersuchung der Abweichung der gemessenen von der modellierten NPP vorgestellt.

3.4.3.1 Prüfung von Teilergebnissen

Von CABIN berechnete CO₂-Konzentrationen im Blatt, Stomataleitfähigkeiten, Photosynthese- und Respiationsflüsse sowie Kohlenhydratpools wurden im Sinne einer Validierung durch Vergleich mit Messdaten auf Plausibilität geprüft. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Verfahren, bei denen einzelne Teilmodelle von CABIN geprüft wurden, geht es hier um Teilergebnisse eines Laufs des gesamten Modells CABIN mit allen seinen Teilmodellen.

Da die Prüfung der Teilergebnisse für alle Stationen zu umfangreich wäre, wurden zwei Stationen ausgesucht, die exemplarisch detailliert untersucht wurden. Es wurde Station 1552 aus dem borealen Nadelwald und Station 80 aus dem tropischen Regenwald gewählt, um unter klimatisch sehr unterschiedlichen Bedingungen auftretende Waldökosysteme zu berücksichtigen. Es wurden für alle Vergleiche Daten aus dem vierten Modelljahr verwendet, in dem CABIN ein steady state (siehe Fußnote auf Seite 35) erreicht hatte.

Vergleiche mit Literaturwerten finden sich im Kapitel Diskussion (Abschnitt 5.2.1).

CO₂-Konzentration im Blatt, CO₂-Flüsse, Stomataleitfähigkeit. Da es sich bei der CO₂-Konzentration im Blatt, der Stomataleitfähigkeit und den CO₂-Flüssen um zeitlich stark variierende Größen handelt, wurde jeweils ein Tag ausgewählt, für den die Werte untersucht wurden. Für Station 80 wurde die Mitte des Jahres, also der zweite Juli, ausgewählt. Für die boreale Station kann dieser Tag nicht verwendet werden, da dort zur Mitte des Jahres nur eine Stunde Dunkelheit herrscht und die Dunkelrespiration sich so schlecht mit Messdaten vergleichen lässt. Daher wurde der erste Tag nach Mitte des Jahres verwendet, an dem vor Mitternacht zwei Stunden lang Dunkelheit herrscht. Dies ist nach den verwendeten Strahlungsdaten der 13. August.

Die zum Vergleich verwendete modellierte Respiration wurde jeweils aus der zweiten Modellstunde mit vollständiger Dunkelheit genommen. Dies ist für Station 80 die um 21 Uhr und für Station 1552 die um 23 Uhr beginnende Stunde.

Bei der Photosynthese wurden die jeweiligen modellierten Tageshöchstwerte ermittelt, da es sich auch bei den Vergleichsdaten um Höchstwerte handelt.

Zusätzlich zu den beschriebenen Tagesdaten wurden weitere Werte verglichen: Jährliche Mittelwerte der CO_2 -Konzentration im Blatt c_i unter günstigen Bedingungen wurden hergeleitet. Als günstig wurden Stunden mit einer Strahlung über $700 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Temperaturen zwischen Referenz- und Optimumstemperatur und einem Bodenwasserpotential über -1 MPa definiert.

Um mit auf die Blattfläche bezogenen Literaturangaben vergleichen zu können, wurden die auf die Grundfläche bezogenen Modelldaten mit Hilfe des Blattflächenindex umgerechnet^h. Wo bei den in der Literatur angegebenen Vergleichsdaten statt der blattflächenbezogenen Angabe eine auf die Trockenmasse bezogene Angabe vorlag, wurde diese mittels der spezifischen Blattfläche auf Flächenbezug umgerechnet.

Kohlenhydratpools. Es wurde geprüft, inwieweit CABIN in der Lage ist, den Aufbau von Kohlenhydratreserven zu simulieren. Assimilatpools sollten nicht in den Bereich der vollständigen Entleerung gelangen. Es wurde daher geprüft, wie sich die Füllstände der Kohlenhydratpools übers Jahr verhalten und wie hoch die Kohlenhydratpools im Mittel über das Jahr gefüllt sind. Letzteres wurde wie folgt berechnet:

$$\%KH = \frac{100}{24 \cdot 365} \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} \left(\frac{KH(d, h)}{Kap(d, h)} \right) \quad (3.7)$$

Hier steht $\%KH$ (%) für den jährlichen mittleren relativen Füllstand eines Kohlenhydratpools, $KH(d, h)$ (gC m^{-2}) für die Kohlenstoffmenge im jeweiligen Kohlenhydratpool, sowie $Kap(d, h)$ (gC m^{-2}) für die Kapazität des Kohlenhydratpools am jeweiligen Tag d zur Stunde h (zur Berechnung der Kapazitäten siehe Abschnitt 4.1.3.1).

3.4.3.2 Abweichungen von gemessenen NPP-Daten

Für alle Stationen wurden die modellierten NPP-Werte mit den gemessenen NPP-Daten aus der ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2) verglichen. Die Abweichungen der modellierten von den gemessenen Werten wurde berechnet und auf Korrelation mit der geographischen Breite und jährlichen Klimadaten untersucht.

Zu diesem Zweck wurden auf Basis der zum Modellantrieb benutzten stündlichen Klimadaten die Jahressumme der Niederschläge, die durchschnittliche Strahlung und die mittlere Jahrestemperatur berechnet und die Korrelation mit den Abweichungen bestimmt. Die Klimagröße, die hier den höchsten Korrelationskoeffizienten ergab, wurde als die einflussreichste im Hinblick auf die Abweichungen interpretiert.

Da die NPP durch die Gaswechselflüsse Photosynthese und Respiration bestimmt wird (Abschnitt 3.1.11), muss die Ursache der gefundenen Abweichungen zwischen modellierter und gemessener NPP in einem unrealistischen Verhältnis dieser Flüsse zueinander liegen. Das Verhältnis der Gesamtrespiration (Summe der Respiration aller Kompartimente der Vegetation) zur Photosynthese wurde daher in Beziehung zu der wie oben beschrieben ermittelten einflussreichsten Klimagröße gesetzt, um zu sehen, ob diese Klimagröße mit dem Quotienten korreliert. Der Korrelationskoeffizient wurde bestimmt.

^hDer Blattflächenindex wurde aus den Phytomassen (Abschnitt 3.3.1) und Daten der spezifischen Blattfläche (aus GIWACOM) berechnet.

Um herauszufinden, ob einer der genannten Flüsse die hauptsächliche Ursache der gefundenen Abweichungen ist, wurde im nächsten Schritt die Jahressummen von Photosynthese und Gesamtrespiration sowie die Füllstände der Kohlenhydratpools (siehe Abschnitt 3.1.7) auf Korrelation mit den Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP untersucht.

Findet sich nur bei einem der genannten Flüsse eine Korrelation mit den Abweichungen, so kann man davon ausgehen, dass dieser hauptsächlich für die gefundenen Abweichungen verantwortlich ist.

Um zu prüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen den Kohlenhydratpools und den Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP gibt, wurde der mittlere jährliche Füllstand dieser Pools (siehe Abschnitt 3.4.3.1) gegen die Abweichungen aufgetragen und der Korrelationskoeffizient bestimmt.

3.4.4 Untersuchung der Bedeutung der Parameter

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Prüfung der Bedeutung verschiedener Parameter und Konstrukte von CABIN (hier zur Vereinfachung allgemein als Parameter bezeichnet) für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels vorgestellt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Parameter von CABIN variiert indem für sie von der Grundparametrisierung (siehe Abschnitte zur Parametrisierung der Teilmodelle) abweichende Werte eingesetzt wurden. Die resultierenden modellierten NPP-Daten wurden ausgewertet.

Im Folgenden wird in dieser Arbeit der Begriff Kohlenstoffbilanz im Sinne von „Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels“ gebraucht.

Variierungskategorien. Die Variierungen wurden in sechs Kategorien vorgenommen:

- Parameter des Speicherungsmodells
- Stickstoffabhängigkeit der Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels
- Temperaturabhängigkeit der Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels
- Menge lebenden Gewebes im Holz
- Grundumsatz des lebenden Gewebes
- Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern

In jeder Variierungskategorie wurden für die Parameter verschiedene Werte eingesetzt. Mit jeder dieser Parametrisierungen wurde für alle Stationen ein Modelllauf bis zum steady state durchgeführt.

Aspekte der Auswertung. Die modellierte NPP der Modellläufe mit variierten Parametern wurde unter zwei Aspekten ausgewertet:

1. Auswirkung der Variierung auf die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP
2. Sensitivität von CABIN bezüglich der Reaktion der modellierten NPP auf die Variierungen

Diese für alle Variierungskategorien gleichermaßen durchgeführten Auswertungen werden in den Abschnitten 3.4.4.1 und 3.4.4.2 beschrieben. Weitere durchgeführte Untersuchungen und Einzelheiten werden anschließend in separaten Abschnitten für die einzelnen Variierungskategorien beschrieben.

Vergleichbarkeit der Variierungen. Es ist schwierig, Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Variierungskategorien herzustellen. Ob das Potential, die modellierte NPP zu verändern, in einer Variierungskategorie größer als in einer zweiten erscheint, hängt von dem Wertebereich ab, in dem die Parameter variiert wurden. Die Bandbreiten müssen einander entsprechen, was aber nicht bedeuten kann, dass immer um die gleichen absoluten oder relativen Beträge variiert wird, da dies in unterschiedlichen Variierungskategorien zu implausiblen Werten für die Parameter führen kann.

Um also Vergleichbarkeit zu erzeugen, wurden in dieser Arbeit für die Parameter Werte aus Wertebereichen eingesetzt, die eine Spanne plausibler Werte bilden. Es wird also versucht, jeweils den gesamten plausiblen Rahmen auszuloten. Da Plausibilität nicht messbar ist, wurde sie auf der Basis von verfügbaren Daten und der Einschätzung des Autors festgelegt.

3.4.4.1 Auswirkung auf die Abweichung von der gemessenen NPP

Um die Auswirkung der Variierung eines Parameters auf die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP beurteilen zu können wurde für diese Arbeit eine geeignete als mittlerer relativer Fehler (MRF, in %) bezeichnete statistische Größe entwickelt. Je geringer der Wert des MRF ausfällt, desto besser reproduziert CABIN die gemessene NPP. Diese Größe ist nicht mit der gleichnamigen auf dem Gebiet der Fehlerrechnung verwendeten Größe zu verwechseln. Der MRF wird als Mittelwert der Beträge der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP in Relation zur gemessenen NPP berechnet:

$$MRF = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{S=1}^{\mathcal{N}} \left| \frac{NPP(S) - NPP_{ORNL}}{NPP_{ORNL}} \right| \cdot 100 \quad (3.8)$$

wobei S die jeweiligen Stationen durchzählt und \mathcal{N} die Anzahl zu mittelnder Stationen bezeichnet. NPP steht für die modellierte und NPP_{ORNL} für die gemessenen NPP an der jeweiligen Station. Der MRF wurde für jeden Vegetationstyp und für die Gesamtheit aller Stationen berechnet.

Der MRF ist ein Maß für die Abweichung zwischen Modell und Messung. Um die Auswirkung der Variierung eines Parameters auf die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP bewerten zu können, wird der MRF eines Modelllaufs mit variiertem Parameter mit dem MRF eines Referenzlaufs verglichen.

Als Referenz wurde für die Variierungskategorie der Parameter des Speicherungsmodells der Lauf bei Grundparametrisierung (siehe Abschnitte zur Parametrisierung der Teilmodelle) eingesetzt. Für die anderen Variierungskategorien wurde ein Modelllauf mit einer davon abweichenden Parametrisierung des Speicherungsmodells als Referenzlauf verwendet (siehe Abschnitt 3.4.4.4).

Zusätzlich wird für jede Station beurteilt, ob der gemessene NPP-Wert innerhalb der Spanne der bei der Variierung eines Parameters erzeugten modellierten NPP-Werte liegt. Wechselnde Vorzeichen der Abweichung der gemessenen von der

modellierten NPP für eine Station innerhalb der Variierung eines Parameters zeigen dies an.

Für jeden Vegetationstyp und die Gesamtheit aller Stationen wurde geprüft, bei wie vielen Stationen beide Vorzeichen dieser Abweichung auftreten.

3.4.4.2 Sensitivität von CABIN

Die Sensitivität von CABIN gegenüber der Variierung eines Parameters wird in dieser Arbeit anhand der dadurch auftretenden Werte der modellierten NPP charakterisiert. Dafür wird die für eine Station erzielte Spanne zwischen der im Rahmen der Variierung eines Parameters aufgetretenen minimalen und maximalen Modell-NPP auf die an der Station gemessene NPP bezogen. Die zu diesem Zweck für diese Arbeit entwickelte Größe wurde „relative Variationsbreite“ (RVB, in %) genannt. Sie kann als Maß für die Bedeutung des variierten Parameters für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels verstanden werden. Die RVB wurde zunächst für einzelne Stationen wie folgt berechnet:

$$RVB_S = \frac{NPP(S)_{max} - NPP(S)_{min}}{NPP(S)_{ORNL}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

hier steht NPP_{max} für die im Rahmen der Variierung des jeweiligen Parameters erzielte maximale und NPP_{min} für die entsprechende minimale modellierte NPP für die jeweiligen Station S . NPP_{ORNL} bezeichnet den an der Station gemessenen NPP-Wert aus der ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2).

Die relative Variationsbreite wurde je einmal für jeden Vegetationstyp und einmal für die Gesamtheit aller Stationen als Mittelwert der RVB_S Werte berechnet:

$$RVB = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{S=1}^{\mathcal{N}} RVB_S \quad (3.10)$$

wobei S die jeweiligen Stationen durchzählt und \mathcal{N} die Anzahl zu mittelnder Stationen beschreibt.

Die RVB ist nur zwischen den verschiedenen Variierungskategorien zu vergleichen. Hier kann sie Aufschluss darüber gegeben, wie hoch der Einfluss eines Parameters auf die modellierte NPP im Vergleich zu den anderen Parametern ist. Ein Vergleich der RVB zwischen verschiedenen Vegetationstypen innerhalb einer Variierungskategorie ist nicht sinnvoll, da der numerische Wert der RVB stark vom Abstand zwischen der Spanne modellierter NPP-Werte und der gemessenen NPP abhängt, die für einzelne Vegetationstypen sehr unterschiedlich sein kann.

3.4.4.3 Variierung der Speicherparameter

Das Speicherverhalten des Speicherungsmodell wird durch drei Parameter (Kapazitäten der zwei Kohlenhydratpools und Füllstandsschwelle) maßgeblich beeinflusst (siehe Abschnitt 4.1.3). Für jeden dieser Parameter wurde je ein geringer, mittlerer und hoher Wert eingesetzt (siehe Tabelle 3.7).

Der mittlere für den Kapazitätsparameter des Assimilatpools k_{KapA} eingesetzte Wert liegt bei 15% des Blattkohlenstoffs (siehe Abschnitt 4.1.3). Für diese Arbeit wird angenommen, dass biologisch auch höhere Werte möglich sind. Als plausibel für einen Höchstwert wurden daher 25% des Blattkohlenstoffs ($k_{KapA} = 0,25$) angenommen.

Tabelle 3.7: Für die Parameter des Speicherungsmodells verwendete Werte (jeweils eine hohe, mittlere und geringe Variante). k_{KapA} – Kapazität des Assimilatpools als relativer Anteil an der lebenden Phytomasse ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$); k_{KapR} – Kapazität des Reservekohlenhydratpools als relativer Anteil an der toten Phytomasse ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$); k_{rem} – relativer Füllstand des Assimilatpools, unter dem remobilisiert wird (Remobilisierungsschwelle). Siehe auch Gleichungen 4.21, 4.22 und 4.23.

Parameter	gering	mittel	hoch
k_{KapA}	0,07	0,15	0,25
k_{KapR}	0,05	0,10	0,20
k_{rem}	0,05	0,10	0,30

Anhand der umfangreichen Daten von Hoch et al. (2003) lässt sich erkennen, dass die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in anderen Organen holziger Pflanzen geringer sein kann, als in den Blättern. Da der Assimilatpool in CABIN als über die gesamte Pflanze verteilt angenommen wird (siehe Abschnitt 3.1.7), ist es plausibel, auch einen geringeren, als den oben angegebenen mittleren Wert anzunehmen. Die Untergrenze des plausiblen Wertebereichs wurde daher auf 7 % ($k_{KapA} = 0,07$) festgelegt.

Ähnlich wie mit k_{KapA} verhält es sich mit k_{KapR} , dem Kapazitätsparameter des Reservekohlenhydratpools. Eine Erhöhung gegenüber dem auf Basis von Literaturangaben eingesetzten Wertes der Grundparametrisierung von 10 % (siehe Abschnitt 4.1.3.2) erscheint plausibel, da die Literaturwerte an Stammholz von Bäumen bestimmt wurden. Nach Hoch et al. (2003) treten im Stamm die geringsten Stärkekonzentrationen auf. Der erhöhte Wert für k_{KapR} wurde daher auf 0,20 (20 %) gesetzt. Die Untergrenze des plausiblen Wertebereichs für k_{KapR} wurde aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit auf 0,05 (5 %) geschätzt.

Mit jeder der 27 möglichen Wertekombinationen für die Parameter k_{KapA} , k_{KapR} und k_{rem} wurde ein Modelllauf mit allen Stationen durchgeführt und die Modell-NPP im steady state bestimmt.

Auf Basis der selben Modellläufe wurden in einem zweiten Schritt für jede Station die Wertekombinationen der drei Parameter identifiziert, unter denen in dieser Variierungskategorie die höchste und geringste Modell-NPP berechnet wurde. Die Ergebnisse wurden nach Vegetationstypen gruppiert und zwischen den Vegetationstypen verglichen, um zu ermitteln, welche Kombinationen von Werten zu höheren und welche zu geringeren Werten der Modell-NPP führen.

3.4.4.4 Ein Parametersatz für die weiteren Variierungsläufe

Anhand der Ergebnisse der Modellläufe mit variierten Speicherparametern wurde entschieden, welcher Parametersatz für die Variierungen in den anderen Variierungskategorien zu verwenden ist. Hierzu wurden der mittlere relative Fehler, die Aussagen über Extrema der modellierten NPP und die modellierte NPP derjenigen Stationen, bei denen die modellierte NPP besonders von der gemessenen abweicht, ausgewertet. Mit dem auf dieser Basis festgelegten Parametersatz wurden alle folgenden Modellläufe gerechnet.

Der Lauf mit diesem Parametersatz wurde für alle weiteren Variierungskategorien als Referenzlauf verwendet, gegenüber dem die Änderungen bewertet wurden.

Tabelle 3.8: Variierung der Parameter der Stickstoffabhängigkeit der Respiration. Angegeben sind die in Gleichung 4.5 und 4.6 eingesetzten Werte für die Parameter $M_{rN,Ref}$, k_{rN} und b_{rN} . Neben dem Wert aus der Grundparametrisierung (Spalte „mittel“) wurde jeweils ein erhöhter und ein verringerter Wert eingesetzt. Die negativen Werte für k_{rN} und b_{rN} ergeben sich aus den Vorzeichen in Gleichung 4.5.

Parameter	Wert		
	gering	mittel	hoch
$M_{rN,Ref}$ (s^{-1})	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$
k_{rN} ($gC \ gN^{-1}$)	-68,651	-47,974	-17,528
b_{rN} ($gN \ gC^{-1}$)	-0,04	-0,01	0,03

3.4.4.5 Variierung der Stickstoffabhängigkeit

In CABIN geht die Stickstoffkonzentration in die Berechnung der Kohlenstoffflüsse Photosynthese und Respiration ein. Bei der Photosynthese geschieht dies im Rahmen der Berechnung der maximalen Carboxylierungsleistung der Rubisco V_{cmax} und der maximalen Elektronentransportkapazität J_{max} (siehe Abschnitt 2.3.1). Für die Respiration geschieht die Berechnung des Respirationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Stickstoffkonzentration (siehe Abschnitt 4.1.2).

Respiration. Das Respirationsmodell von CABIN beschreibt die Stickstoffabhängigkeit durch eine sigmoiden Funktion mit drei Parametern (Gleichung 4.5). Der in Abschnitt 4.1.2.4 dargestellten Grundparametrisierung liegen Messdaten von Kattge (2002) zugrunde. Teilmengen dieser Messdaten wurden verwendet, um plausible Wertebereiche für die drei Parameter zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde der in den Abschnitten 3.1.6.3 und 4.1.2.4 beschriebene Parametrisierungsvorgang für das Respirationsmodell für jede der von Kattge (2002) untersuchten Pflanzenarten jeweils einmal separat durchgeführt.

Da die Anzahl der pro Art von Kattge erhobenen Datensätze für eine vollständige Parametrisierung nicht ausreicht (Daten nicht gezeigt), wurde jeder der drei Parameter separat an die Messdaten angepasst, wobei die Werte der zwei übrigen Parameter jeweils bei Werten der Grundparametrisierung belassen wurden. Für diesen Anpassungsvorgang wurde die gemessene Respiration über den bei der Parametrisierung des Gesamtmodells ermittelten Q_{10} -Wert (siehe Abschnitt 4.1.2.4) auf die Referenztemperatur der Respirationmessung umgerechnet.

Aus den resultierenden artspezifischen Werten für die drei Parameter wurde jeweils der geringste und höchste Wert ermittelt und als Grenzen der Spanne plausibler Werte für den jeweiligen Parameter interpretiert. Die so ermittelten Werte sind in Tabelle 3.8 dargestellt.

Für jede der 27 möglichen Wertekombinationen wurde ein Modelllauf durchgeführt. Dabei wurden die Werte aller weiteren Koeffizienten und Parameter bei den Werten aus der Grundparametrisierung belassen.

Photosynthese. Im Photosynthesemodell von CABIN werden lineare Funktionen eingesetzt, um V_{cmax} und J_{max} aus der Stickstoffkonzentration herzuleiten (siehe Abschnitt 2.3.1). Die Parameter „y-Achsenabschnitt“ (o_j , o_v) und „Steigung“ (m_j , m_v) beider Funktionen wurden variiert.

Die in der Grundparametrisierung für die Parameter eingesetzten Werte (Abschnitt 2.3) wurden von J. Kattge zur Verfügung gestellt. Sie stammen aus einer Zusammenstellung von fast 5000 Sätzen von Messdaten und basieren auf den darin enthaltenen Datensätzen für C₃-Pflanzen (Kattge, persönliche Mitteilung). Neben C₃-Pflanzen hat Kattge auch für weitere Gruppen von Pflanzenarten Werte für die Parameter der N-Abhängigkeit der Photosynthese ermittelt. Für folgende Gruppen liegen für die Berechnung von sowohl V_{cmax} als auch J_{max} Werte vor:

- C₃-Pflanzen
- immergrüne Pflanzen
- laubabwerfende Pflanzen
- annuelle Pflanzen
- tropische Pflanzen
- Pflanzen aus temperierten Gebieten
- Nadelpflanzen
- tropische immergrüne Bäume
- immergrüne Bäume aus temperierten Gebieten
- laubabwerfende Bäume aus temperierten Gebieten
- immergrüne Nadelbäume
- immergrüne Sträucher
- krautige C₃-Pflanzen
- C₃-Nutzpflanzen

Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3.9 angegeben (eine Zuordnung der Werte zu den oben angegebenen Pflanzengruppen kann hier nicht gegeben werden, da es sich um noch unveröffentlichte Daten handelt). Für jeden der angegebenen Parametersätze wurde ein Modelllauf durchgeführt. Bei einigen der Parametersätzen ergeben sich im Rahmen der an den Stationen auftretenden Stickstoffkonzentrationen (siehe Abschnitt 3.3.1) negative Werte von V_{cmax} und J_{max} . Um dies zu verhindern wurden Minimumswerte der Stickstoffkonzentration festgelegt. Diese wurden ermittelt, indem in die Standardgleichungen für V_{cmax} und J_{max} (Gleichungen 2.6 und 2.7) die geringste von Kattge (2002) ermittelte Stickstoffkonzentration von 8,4mgN gDW⁻¹ eingesetzt wurde. Der daraus resultierende Minimumswert für V_{cmax} liegt bei 0,06 μmolC gDW⁻¹ s⁻¹, der für J_{max} bei 0,12 μmol e^o gDW⁻¹ s⁻¹.

3.4.4.6 Variierung der Temperaturabhängigkeit

In CABIN wird nur die direkte Temperaturabhängigkeit der beiden großen Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels Photosynthese und Respiration berücksichtigt. In dieser Variierungskategorie wurden folgende Parameter variiert:

1. Q₁₀ der Respiration (Gleichungen 4.6 und 4.24)
2. Optimumstemperatur T_{opt} der Photosynthese (Gleichung 2.18)
3. Referenztemperatur T_{Ref} (Gleichungen 2.16, 2.17 und 4.6)

Bei jeder Variierung wurde der entsprechende Parameter je einmal erhöht und verringert. Als Vergleichslauf diente der anhand der Läufe zur Speicherparametrisierung ausgewählte Referenzlauf (siehe Abschnitt 3.4.4.4).

Im Folgenden werden die durchgeführten Variierungen im Einzelnen erklärt.

Tabelle 3.9: Variierung der Parameter der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese. Angegeben sind die in den Gleichungen 2.6 und 2.7 eingesetzten Werte für y -Achsenabschnitt o und Steigung m für die maximale Carboxylierungsleistung der Rubisco V_{cmax} und die maximale Elektronentransportkapazität J_{max} . Die Datensätze gelten für verschiedenen Pflanzengruppen (siehe Abschnitt 3.4.4.5). In der mit „standard“ bezeichneten Zeile sind die Werte aus der Grundparametrisierung angegeben. Einheit von o_v und o_j ist $\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$, Einheit von m_v und m_j ist $\mu\text{molC mgN}^{-1} \text{s}^{-1}$. Um keine negativen Werte für V_{cmax} und J_{max} zu erhalten, wurden Mindestwerte festgelegt (siehe Text).

Datensatz	V_{cmax}		J_{max}	
	o_v	m_v	o_j	m_j
standard	-0,36	0,05	-0,72	0,10
1	-0,10	0,04	-0,07	0,06
2	-0,10	0,04	0,16	0,06
3	-0,09	0,06	0,35	0,10
4	-0,19	0,02	-0,89	0,06
5	-0,07	0,03	0,13	0,06
6	-0,05	0,03	-0,10	0,07
7	-0,47	0,03	-0,89	0,06
8	-0,06	0,03	-0,13	0,06
9	-0,13	0,04	0,16	0,06
10	-0,01	0,02	0,10	0,05
11	0,13	0,02	0,43	0,03
12	-0,10	0,05	0,39	0,10
13	0,59	0,04	1,14	0,09

Q₁₀ der Respiration. Für den Q₁₀ der pflanzlichen Respiration werden in der Literatur verschiedene Werte berichtet. Kattge (2002) fand bei seinen Messungen Q₁₀-Werte zwischen 1,6 und 2,9 und liegt damit im Rahmen der am häufigsten in der Literatur berichteten Werte (Ivanova et al., 1989; Tjoelker et al., 2001; Atkin et al., 2005). Die von Kattge gefundenen Extremwerte weichen von dem in dieser Arbeit verwendeten Wert von 1,99 (Herleitung siehe Abschnitt 4.1.2.4) um -0,4 und +0,9 ab. Um diesen Bereich in etwa abzudecken und den Q₁₀ gleichermaßen nach oben und unten zu variieren wurde er um $\pm 0,5$ variiert.

Optimumstemperatur der Photosynthese. Die Optimumstemperatur T_{opt} der Photosynthese wird in CABIN aus der Referenztemperatur hergeleitet (Abschnitt 4.1.1.1).

Es wurde eine relative Variierung gewählt, um zu vermeiden, dass an Stationen mit niedrigen Optimumstemperaturen negative Werte auftreten, da in der vorliegenden Literatur nirgends negative T_{opt} -Werte berichtet werden. Um einen plausiblen Prozentsatz zur Variierung zu ermitteln, wurden die zur Parametrisierung der Funktion zur Herleitung von T_{opt} (Gleichung 4.2) verwendeten Referenztemperaturdaten (Medlyn et al., 2002) in ebendiese Funktion eingesetzt. Die so berechneten Optimumstemperaturen wurden mit denen zu den eingesetzten Referenztemperaturen gehörenden Messdaten der Optimumstemperatur (Medlyn et al., 2002) verglichen. Es ergaben sich für die Optimumstemperatur der maximalen Carboxylierungsrate Abweichungen vom Messwert bis zu 28,2% und für die der maximalen Elektronen-

transportrate von bis zu 26,4 %, wobei bei letzterer zwei Ausreißer mit Abweichungen im Bereich von 60 % unberücksichtigt blieben.

Ausgehend von diesen Daten wurde die Optimumstemperatur der Photosynthese um $\pm 30\%$ variiert.

Referenztemperatur. In CABIN ist die Temperaturabhängigkeit der Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels über die Abweichung der herrschenden von der Referenztemperatur geregelt (siehe Gleichungen 2.16, 2.17, 4.6 und 4.24). Durch die Variierung der Referenztemperatur wird also gleichzeitig die Temperaturabhängigkeit der Respiration, die der maximalen Carboxylierungs- und Elektronentransportrate der Photosynthese und die der kinetischen Parameter der Rubisco variiert. Zusätzlich sind auch die temperaturabhängigen Prozesse der Stomataregulation betroffen (siehe Esser und Hoffstadt, 2000).

Die Referenztemperatur ist in GIWACOM den einzelnen Vegetationstypen zugeordnet. Für die vorliegende Arbeit wurden in der Grundparametrisierung diejenigen Referenztemperaturwerte verwendet, die den Schmithüsen-Vegetationstypen der jeweiligen Gitterelemente des GIWACOM zugeordnet sind, in denen die Stationen liegen (siehe Abschnitt 3.2). Diese Zuordnung von Referenztemperaturen zu Vegetationstypen birgt das Problem, dass die Temperaturbedingungen an den verschiedenen Standorten eines Vegetationstyps sehr unterschiedlich sein können: Untersucht man die Spannen der an verschiedenen Standorten auftretenden mittleren Jahrestemperaturen (basierend auf Leemans und Cramer, 1991) für die Schmithüsen-Vegetationstypen auf globaler Ebene, so finden sich Fälle, in denen die geringste und höchste mittlere Jahrestemperatur eines Vegetationstyps um über 30°C auseinander liegen (siehe Anhang H). Gemittelt über sämtliche Schmithüsen-Vegetationstypen ergibt sich global eine durchschnittliche Spanne von 15°C .

Die selbe Betrachtung, bezogen auf die verallgemeinerten Vegetationstypen und mittlere Jahrestemperaturen basierend auf Wetterdaten aus dieser Arbeit (Tabelle 4.6), zeigt Spannen der mittleren Jahrestemperatur bis $11,3^{\circ}\text{C}$ (Wüsten). Die durchschnittliche Spanne, gemittelt über die Spannen aller Vegetationstypen aus dieser Arbeit mit mehr als einer Station, beträgt $6,7^{\circ}\text{C}$.

Da T_{Ref} nach oben wie unten variiert werden soll, muss die Hälfte der gefundenen Spannen betrachtet werden: $\pm 3,4^{\circ}\text{C}$ für die Vegetationstypen aus dieser Arbeit und $\pm 7,5^{\circ}\text{C}$ für Schmithüsen-Vegetationstypen global. Zur Variierung der Referenztemperatur im plausiblen Bereich wurde mit $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ein Wert in der Mitte gewählt.

3.4.4.7 Variierung der Menge lebenden Gewebes

Die Menge lebenden Gewebes im Holz wird in CABIN anhand der Menge Stickstoff im Holz und der Annahme, dass die Stickstoffkonzentration von lebendem Holz derjenigen im Blatt gleicht, bestimmt (Abschnitt 3.1.6.3 auf Seite 30).

Diese Annahmen bergen Unsicherheiten, die aufgrund des Mangels an Messdaten nicht quantifizierbar sind. Plausible Werte müssen geschätzt werden.

Bei der Variierung wurde vorrangig darauf Wert gelegt, die Bedeutung der Menge lebenden Gewebes für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen des tropischen Regenwaldes zu untersuchen, weil dort die modellierte NPP in den meisten Fällen null ist (siehe Ergebnisse der vorigen Variierungskategorien in Abschnitt 4.4).

Die Menge lebenden Gewebes im Holz beeinflusst die Modell-NPP durch den respiratorischen Assimilatverbrauch. Um zu prüfen, ob sich die modellierte NPP

der tropischen Regenwaldstationen durch die Variierung erhöhen lässt, wurde daher die Menge lebenden Gewebes verringert. Als plausibel wurden Verringerungen um bis zu 40 % geschätzt, so dass 60 % der ursprünglich berechneten Menge lebenden Gewebes verbleiben. Ein weiterer Modelllauf wurde mit 80 % verbleibender Menge lebenden Gewebes im Holz durchgeführt. Als Vergleichslauf diente jeweils der anhand der Läufe zur Speicherparametrisierung ausgewählte Referenzlauf (siehe Abschnitt 3.4.4.4).

3.4.4.8 Variierung des Grundumsatzes

Der Grundumsatz des lebenden Gewebes wird in CABIN in Abhängigkeit von der Stickstoffkonzentration berechnet (siehe Abschnitt 3.1.8). Um plausible Werte für die Variierung des Grundumsatzes zu ermitteln, wurden die von Ryan (1991a) zur Parametrisierung der verwendeten Funktion benutzten Daten der Stickstoffkonzentration wieder in ebendiese Funktion eingesetzt. Es wurde untersucht, inwieweit die so berechneten Grundumsatzwerte den von Ryan (1991a) verwendeten gemessenen Grundumsatzdaten entsprechen. Es ergaben sich Abweichungen des modellierten vom gemessenen Grundumsatz zwischen -52 % und +208 % (Daten nicht gezeigt). Innerhalb dieses Bereiches soll auch der Grundumsatz in dieser Arbeit variiert werden. Die Obergrenze von über +200 % scheint jedoch sehr hoch, da ein dreifacher Grundumsatz die Allokation und damit die modellierte NPP sehr stark reduzieren würde. Als plausibler Bereich der Variierung wurde daher die Spanne zwischen Halbierung (-50 %) und Verdoppelung (+100 %) festgelegt.

Um die Variierung des Grundumsatzes in CABIN einzubringen, wurde in Gleichung 3.1 ein zusätzlicher Multiplikator eingeführt, für den folgende Werte eingesetzt wurden:

$$\frac{1}{0,5} \quad \frac{1}{0,75} \quad \frac{1}{1,5} \quad \frac{1}{1,75} \quad \frac{1}{2,0}$$

Als Vergleichslauf diente der anhand der Läufe zur Speicherparametrisierung ausgewählte Referenzlauf (siehe Abschnitt 3.4.4.4).

3.4.4.9 Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern

Da die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern in der Literatur häufig diskutiert wurde (siehe Abschnitt 3.1.5), wurde ein solcher Prozess zusätzlich in CABIN eingeführt: Es wurde ein vom Assimilatpool abhängiger zusätzlicher Koeffizient ergänzt, mit dem die maximale Carboxylierungs- und Elektronentransportrate multipliziert werden (siehe Abschnitt 4.1.1.2). Zur Berechnung dieses Koeffizienten wird eine relative Füllstandsschwelle s des Assimilatpools definiert, bei deren Überschreiten die Verringerung der Photosynthese beginnt und dann mit steigendem Füllstand des Pools linear zunimmt.

Der Füllstand eines Kohlenhydratpools berechnet sich aus dem Quotient aus der Poolgröße und der Kapazität des Pools (siehe Abschnitt 3.4.3.1, Gleichung 3.7). Die Kapazität eines Kohlenhydratpools ist messtechnisch nicht erfassbar, da anhand einer Messung nicht erkennbar ist, ob die Maximalgröße eines Pools erreicht ist. Aus diesem Grund ist auch der Füllstand eines Kohlenhydratpools nicht messbar. Werte für s müssen daher geschätzt werden.

Um den Einfluss der Verringerung der Photosynthese auf die Modellierung der Kohlenstoffbilanz zu untersuchen, wurde s je einmal auf 0,5 und auf 0,75 gesetzt. Als Referenzlauf diente der anhand der Läufe zur Speicherparametrisierung ausgewählte Referenzlauf (siehe Abschnitt 3.4.4.4).

Kapitel 4

Ergebnisse

Im Kapitel Ergebnisse werden zunächst die Gleichungen und die Parametrisierung der für diese Arbeit entwickelten Teilmodelle dargestellt (Abschnitt 4.1). Dies sind die Erweiterungen des Photosynthesemodells (Abschnitt 4.1.1), das Respirationsmodell (4.1.2), das Speicherungsmodell (4.1.3) und das Allokationsmodell (4.1.4). Es folgt die Darstellung der Ergebnisse der Prüfung der Teilmodelle (Abschnitt 4.2) wobei das Photosynthesemodell (Abschnitt 4.2.1), das Respirationsmodell (4.2.2) und der Ansatz zur Berechnung der Menge lebenden Gewebes im Holz (4.2.3) geprüft wurden. Anschließend werden Ergebnisse der Prüfung des gesamten Modells CABIN vorgestellt (Abschnitt 4.3). Dabei werden wichtige Teilergebnisse vorgestellt (Abschnitt 4.3.1) und Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP analysiert (4.3.2). Schließlich werden in Abschnitt 4.4 die Ergebnisse der Untersuchungen zur Bedeutung einiger Modellparameter für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels gezeigt.

4.1 Die neuen Teilmodelle

4.1.1 Erweiterungen des Photosynthesemodells

In diesem Abschnitt sind die für diese Arbeit entwickelten Funktionen zur Erweiterung des Photosynthesemodells (siehe Abschnitte 2.3 und 3.1.5) gezeigt.

4.1.1.1 Optimumstemperatur der Photosynthese

Für diese Arbeit wurde eine Möglichkeit entwickelt, die Optimumstemperatur T_{opt} (K) der Photosynthese abzuschätzen.

Ausgehend von Daten zu Optimums- und Referenztemperatur von Medlyn et al. (2002) wurde zur Verwendung in CABIN der lineare Zusammenhang zwischen der Optimumstemperatur und dem Verhältnis von Referenztemperatur (T_{Ref} , K) zur Optimumstemperatur aufgestellt:

$$\frac{T_{Ref}}{T_{opt}} = m \cdot T_{Ref} + o \quad (4.1)$$

Dies wird nach T_{opt} aufgelöst:

$$T_{opt} = \frac{1}{m + \frac{o}{T_{Ref}}} \quad (4.2)$$

Tabelle 4.1: Parameter für die Bestimmung der Optimumstemperatur von V_{cmax} und J_{max} nach Gleichung 4.2, basierend auf Daten aus Medlyn et al. (2002). Symbole: m Steigung und o y -Achsenabschnitt der linearen Funktion aus Gleichung 4.1; V_{cmax} – maximale Carboxylierungsrate der Rubisco; J_{max} – maximale Transportleistung der Elektronentransportkette.

Parameter	o	m (K ⁻¹)
V_{cmax}	0,356	$1,98 \cdot 10^{-3}$
J_{max}	0,402	$1,88 \cdot 10^{-3}$

Das Verfahren wurde separat für die Elektronentransportkapazität J_{max} und die maximale Carboxylierungsrate V_{cmax} durchgeführt. Die empirisch ermittelten Werte für m und o finden sich in Tabelle 4.1.

Für eine Referenztemperatur von 20°C ($\sim 293,15$ K) ergibt sich demnach eine Optimumstemperatur von 39,9°C für V_{cmax} und von 34,4°C für J_{max} .

4.1.1.2 Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern

Um den Effekt der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern in CABIN einzubinden (siehe Abschnitt 3.1.5) wird ein zusätzlicher Koeffizient k_{Assim} eingeführt. Er wird bei der Berechnung der maximalen Elektronentransportrate (Gleichung 2.6) und bei der Berechnung der maximalen Carboxylierungsrate der Rubisco (Gleichung 2.7) multiplikativ ergänzt. Zur Berechnung des Koeffizienten wird eine Schwelle s des relativen Füllstandes des Assimilatpools gesetzt. Wird diese Schwelle überschritten, wird die Photosynthese mit zunehmendem relativen Füllstand linear bis auf minimal 10 % der ursprünglichen Leistung verringert:

$$k_{Assim} = \min\left(1; 1 - \frac{0,9}{1-s} \left(\frac{Assim}{Kap_A} - s\right)\right) \quad (4.3)$$

Zu den Auswirkungen der Einführung dieses zusätzlichen Regulationsprozesses auf die modellierte NPP siehe Abschnitt 4.4.1.10.

4.1.2 Gleichungen des Respirationsmodells

Das für diese Arbeit entwickelte Respirationsmodell basiert auf einer Kombination von angebots- und bedarfsorientierter Beschreibung (siehe Abschnitt 3.1.6.1). Prinzipiell berechnet sich die Respiration R (gC_{KH} gC⁻¹ s⁻¹) als

$$R = k_r \cdot [Assim]^z \cdot 10^{-3} \quad (4.4)$$

wobei $[Assim]$ (mgC_{KH} gC⁻¹) für die Assimilatkonzentration und k_r für den Respirationskoeffizienten (s⁻¹) steht. z ist ein Exponent zwischen 0 und 1, der den Einfluss der Assimilate bei hohen Konzentrationen verringert. Da $[Assim]^z > [Assim]$ für $0 < z < 1$ und $0 < [Assim] < 1$ gilt, wird als Einheit der Assimilatkonzentration hier mgC_{KH} gC⁻¹ verwendet, um numerische Probleme zu unterbinden. Der Faktor 10^{-3} dient der Umrechnung von Milligramm in Gramm.

Der Respirationskoeffizient wird durch eine sigmoide Funktion in Abhängigkeit von der Stickstoffkonzentration im Gewebe beschrieben:

$$k_r = \frac{M_{rN}}{1 + e^{(k_{rN} \cdot (\Delta[N] - b_{rN}))}} \quad (4.5)$$

Hier sind k_{rN} (gC gN^{-1}) und b_{rN} (gN gC^{-1}) empirisch zu bestimmende Parameter. M_{rN} bezeichnet den Maximalwert des Respirationskoeffizienten (s^{-1}) und $\Delta[N]$ (gN gC^{-1}) die Abweichung der herrschenden Stickstoffkonzentration von einer festgelegten Referenzstickstoffkonzentration.

Der Maximalwert des Respirationskoeffizienten ist von der Temperatur abhängig (siehe Abschnitt 4.1.2.4):

$$M_{rN} = Q_{10}^{\frac{T-T_{Ref}}{10}} \cdot M_{rN,Ref} \quad (4.6)$$

Hier beschreibt $M_{rN,Ref}$ (s^{-1}) den Maximalwert des Respirationskoeffizienten bei Referenztemperatur.

Bestimmung der Assimilatkonzentration. Die Konzentration der Assimilate $[Assim]$ berechnet sich für die Gesamtheit der lebenden Gewebe als

$$[Assim] = \frac{Assim}{C_{ha} + C_{wa,l} + C_{hb} + C_{wb,l}} \cdot 10^3 \quad (4.7)$$

Hier steht C für einen Kohlenstoffpool der Strukturphytomasse (gC m^{-2}) und $Assim$ (gC m^{-2}) für den Assimilatpool. Bei den Indizes steht h für krautig, w für holzig, b für unterirdisch, a für oberirdisch und l für den lebenden Anteil bei holzigen Kompartimenten. Der Faktor 10^3 dient der Umrechnung von Gramm nach Milligramm.

4.1.2.1 Verringerung der Blattrespiration bei Licht

Bei Licht verringert sich die respiratorische Decarboxylierung im Blatt gegenüber der Dunkelrespiration (siehe Abschnitt 3.1.6.2 Teil Licht auf Seite 28). Das bei der Photorespiration frei werdende CO_2 wurde bereits im Rahmen der Photosynthese berücksichtigt (Gleichung 2.14).

Der Zusammenhang wird durch eine einfache sigmoide Funktion beschrieben:

$$k_l = \frac{k_1}{k_2 + e^{(k_3 \cdot I_0 - k_4)}} + 0,5 \quad (4.8)$$

Die Werte der Parameter k_1 bis k_4 sind empirisch zu bestimmen (siehe Abschnitt 4.1.2.4).

4.1.2.2 Respiration der einzelnen Kompartimente

Der Respirationskoeffizient k_r wird für die ober- und unterirdischen krautigen Kompartimente separat nach Gleichung 4.5 als $k_{r,a}$ und $k_{r,b}$ bestimmt. Diese Koeffizienten werden dann auch auf den lebenden Anteil des jeweiligen zugehörigen holzigen Kompartimentes angewandt.

Die massenbezogene Respiration ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) der vier Kompartimente berechnet sich nach folgenden Gleichungen:

$$R_{ha} = k_{r,a} \cdot [\textit{Assim}]^z \cdot k_l \cdot 10^{-3} \quad (4.9)$$

$$R_{wa} = k_{r,a} \cdot [\textit{Assim}]^z \cdot 10^{-3} \quad (4.10)$$

$$R_{hb} = k_{r,b} \cdot [\textit{Assim}]^z \cdot 10^{-3} \quad (4.11)$$

$$R_{wb} = R_{hb} \quad (4.12)$$

Der Faktor 10^{-3} ergibt sich aus der Einheit der Assimilatkonzentration, die von mgC gC^{-1} auf gC gC^{-1} umzurechnen ist. Die massenbezogene Respiration der unterirdischen Kompartimente gleicht sich (Gleichung 4.12), da dort keine Hemmung durch Licht vorkommt.

4.1.2.3 Bestimmung der Menge lebenden Gewebes in den holzigen Kompartimenten

Die Menge Kohlenstoff im lebenden Gewebe des unterirdischen holzigen Kompartimentes $C_{wb,l}$ (gC m^{-2}) berechnet sich unter der Annahme, dass die lebenden Gewebe in den holzigen Kompartimenten die gleiche Stickstoffkonzentration aufweisen, wie die zugehörigen krautigen Kompartimente (siehe Abschnitt 3.1.6.3, Seite 30):

$$C_{wb,l} = \frac{N_{wb}}{[N_{hb}]} \quad (4.13)$$

wobei N_{wb} (gN m^{-2}) den Stickstoffpool des holzigen unterirdischen Kompartimentes und $[N_{hb}]$ (gN gC^{-1}) die Stickstoffkonzentration im unterirdischen krautigen Kompartiment bezeichnet. Hierbei wird angenommen, dass die unterirdischen toten holzigen Gewebe keinen Stickstoff enthalten.

Für das oberirdische holzige Kompartiment wird die Möglichkeit gegeben, einen relativen Stickstoffanteil am Trockengewicht $N_{dw,rel}$ des toten Holzes annehmen zu können. Dieser Anteil wurde auf 0,001 (0,1 %) gesetzt. Auch hier gilt die Annahme von 45 % Kohlenstoffanteil am Trockengewicht. Der lebende Kohlenstoffpool im Holz $C_{wa,l}$ (gC m^{-2}) ist dann

$$C_{wa,l} = \frac{N_{dw,rel} \cdot C_{wa} - 0,45N_{wa}}{N_{dw,rel} - 0,45[N_{ha}]} \quad (4.14)$$

C_{wa} steht für den oberirdischen holzigen Kohlenstoffpool (gC m^{-2}), N_{wa} für den oberirdischen holzigen Stickstoffpool (gN m^{-2}) und $[N_{ha}]$ für die Stickstoffkonzentration im Blatt (gN gC^{-1}).

4.1.2.4 Parametrisierung

Das Konzept des schrittweisen Parametrisierungsvorgangs ist in Abschnitt 3.1.6.3 (ab Seite 30) beschrieben. Die für die Parametrisierung des Respirationsmodells eingesetzten Daten stammen von Kattge (2002).

Für die Bestimmung des Respirationkoeffizienten k_r wurde zuerst Gleichung 4.4 integriert, wobei die Respiration als Änderung der Kohlenhydratkonzentration mit der Zeit interpretiert wurde:

$$\int_{KH(t_{n-1})}^{KH(t_n)} \frac{dKH}{KH^z} = k_r \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt, n \in [1, \dots, 5] \quad (4.15)$$

Hier symbolisiert KH die Kohlenhydratkonzentration. t_{n-1} steht für den Zeitpunkt vor der Respirationsmessung, t_n für den unmittelbar danach. n nimmt die Werte 1 bis 5 für die fünf von Kattge (siehe Abschnitt 3.1.6.3) für jede Pflanzenart durchgeführten Respirationsmessungen an. Aufgelöst nach k_r ergibt sich

$$k_r = \frac{KH^{1-z}(t_n) - KH^{1-z}(t_{n-1})}{(1-z)(t_n - t_{n-1})}, n \in [1, \dots, 5] \quad (4.16)$$

Da die Kohlenhydratkonzentration KH nur nach Ende der fünf aufeinander folgenden Respirationsmessungen bestimmt wurde, mussten die Konzentrationen für die ersten vier Messungen ($n = 1$ bis $n = 4$) zurückgerechnet werden. Dazu wurde angenommen, dass kein anderer Prozess außer der Respiration den Kohlenhydratgehalt ändert, und dass die Respiration über den gesamten Zeitraum einer Messung konstant war (siehe Abschnitt 3.1.6.3):

$$KH(t_n) = KH(t_5) + \sum_{x=n+1}^5 R(t_x)(t_x - t_{x-1}), n \in [1, \dots, 4] \quad (4.17)$$

Im zweiten Schritt müssen die zur Berechnung von k_r in Abhängigkeit von der Stickstoffkonzentration (Gleichung 4.5) benötigten Parameter M_{rN} , k_{rN} und b_{rN} bestimmt werden. Sie wurden separat für jede Temperaturstufe an die Wertepaare von k_r und der Stickstoffkonzentration $[N]$ angepasst. Die Resultate finden sich in Tabelle 4.2 a (Parametrisierung mit $z = 0,26$).

Ein Vergleich der Werte der Parameter bei den verschiedenen Temperaturstufen zeigt für k_{rN} ein Maximum bei der Temperaturstufe 25°C. b_{rN} zeigt dort ein Minimum. Allein M_{rN} steigt durchgängig mit der Temperatur.

Für die drei Parameter wurden Q_{10} -Werte wie folgt berechnet:

$$Q_{10} = \left(\frac{X_{T2}}{X_{T1}} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \quad (4.18)$$

X steht hier für den Wert des jeweiligen Parameter bei der jeweiligen Temperatur T . Die für k_{rN} und b_{rN} ermittelten Q_{10} -Werte (Tabelle 4.2 b) liegen um 1. Diese Parameter zeigen somit keine starke Abhängigkeit von der Temperatur. Daher wurden für k_{rN} und b_{rN} die Mittelwerte der für die fünf Temperaturstufen ermittelten Werte ins Respirationsmodell eingesetzt: $k_{rN} = -47,98 \text{ gC gN}^{-1}$ und $b_{rN} = -7,56 \cdot 10^{-3} \text{ gN gC}^{-1}$.

Aufgrund der deutlichen Temperaturabhängigkeit von M_{rN} (Maximalwert des Respirationskoeffizienten) wurde nun ausschließlich dieser dazu verwendet, die Temperaturabhängigkeit ins Respirationsmodell einzubringen. Es handelt sich bei M_{rN} also nicht um einen statischen Parameter, sondern um einen mit der Temperatur veränderlichen Koeffizienten. Um seinen Wert festzulegen, wurden die Mittelwerte für k_{rN} und b_{rN} in Gleichung 4.5 eingesetzt und M_{rN} nun als einziger Koeffizient angepasst (Tabelle 4.2 c). Anschließend wurden erneut Q_{10} -Werte für M_{rN} bestimmt (Tabelle 4.2 d).

Die so für M_{rN} ermittelten Q_{10} -Werte zeigen keine einheitliche Abhängigkeit von der Temperatur. Daher wurde der Mittelwert ($Q_{10} = 1,99$) in CABIN (Gleichung 4.6) eingesetzt. Um den Q_{10} anwenden zu können, muss in einem letzten Schritt der Wert von M_{rN} bei Referenztemperatur ($M_{rN,Ref}$) berechnet werden, auf

Tabelle 4.2: Zwischenschritte der Parametrisierung des Respirationsmodells: a) Der Koeffizient M_{rN} (Maximalwert des Respirationskoeffizienten) und die Parameter k_{rN} und b_{rN} (empirisch bestimmte Parameter) aus Gleichung 4.5 wurden an berechnete Respirationskoeffizienten k_r und Messdaten der Stickstoffkonzentration angepasst. b) Q_{10} -Werte für M_{rN} , k_{rN} und b_{rN} . Der Q_{10} wurde für vier Temperaturänderungen berechnet. Diese liegen jeweils zwischen den Temperaturstufen 15, 20, 25, 30 und 33°C. c) M_{rN} wurde an berechnete k_r und Messdaten der Stickstoffkonzentration angepasst. Die weiteren Parameter aus Gleichung 4.5 waren $k_{rN} = -47,98 \text{ gC gN}^{-1}$ und $b_{rN} = -7,5610^{-3} \text{ gN gC}^{-1}$. d) Q_{10} -Werte für M_{rN} . Der Q_{10} wurde für die vier Temperaturänderungen berechnet. Alle gezeigte Werte entstammen einem Parametrisierungslauf mit $z = 0,26$ (Gleichung 4.4).

a)

	T (°C)				
	15	20	25	30	33
M_{rN} (s ⁻¹)	$0,991 \cdot 10^{-4}$	$1,418 \cdot 10^{-4}$	$2,090 \cdot 10^{-4}$	$2,920 \cdot 10^{-4}$	$3,667 \cdot 10^{-4}$
k_{rN} (gC gN ⁻¹)	-47,88	-49,57	-50,11	-47,34	-44,98
b_{rN} (gN gC ⁻¹)	$-10,59 \cdot 10^{-3}$	$-7,57 \cdot 10^{-3}$	$-5,87 \cdot 10^{-3}$	$-6,66 \cdot 10^{-3}$	$-7,12 \cdot 10^{-3}$

b)

Q_{10}	Temperaturbereich (°C)			
	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 33
M_{rN}	2,06	2,17	1,94	1,97
k_{rN}	1,07	1,02	0,89	0,86
b_{rN}	0,51	0,60	1,28	1,19

c)

	T (°C)				
	15	20	25	30	33
M_{rN} (s ⁻¹)	$1,029 \cdot 10^{-5}$	$1,423 \cdot 10^{-5}$	$2,053 \cdot 10^{-5}$	$2,883 \cdot 10^{-5}$	$3,622 \cdot 10^{-5}$

d)

Q_{10}	Temperaturbereich (°C)			
	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 33
M_{rN}	1,93	2,08	1,96	1,98

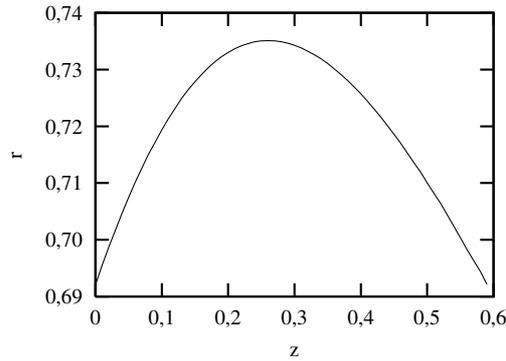


Abbildung 4.1: Zur Anpassung des Respirationmodells an die Messdaten von Kattge (2002). Ergebnisse der Korrelationsanalyse von modellierter und gemessener Respiration bei unterschiedlichen Werten für den Exponenten z (Gleichung 4.4). r : Korrelationskoeffizient.

Tabelle 4.3: Werte der Parameter des Respirationmodells. Symbole: z – Exponent zur Regulierung des Einflusses der Assimilatkonzentration auf die Respiration; $M_{rN,Ref}$ – Maximalwert des Respirationskoeffizienten bei Referenztemperatur (s^{-1}); k_{rN} – empirischer Parameter zur Bestimmung des Respirationskoeffizienten ($gC\ gN^{-1}$); b_{rN} – empirischer Parameter zur Bestimmung des Respirationskoeffizienten ($gN\ gC^{-1}$); Q_{10} – Temperaturabhängigkeit der Respiration.

Parameter	Wert
z	0,26
$M_{rN,Ref}$	$1,46 \cdot 10^{-4}\ s^{-1}$
k_{rN}	$-47,9740\ gC\ gN^{-1}$
b_{rN}	$-0,00756\ gN\ gC^{-1}$
Q_{10}	1,99

den sich Q_{10} bezieht. Dazu wurde das gesamte Respirationmodell zu einer einzigen Gleichung zusammengefasst (Gleichung 4.6 in Gleichung 4.5 in Gleichung 4.4 eingesetzt), integriert und nach $M_{rN,Ref}$ aufgelöst. Es ergibt sich

$$M_{rN,Ref} = \frac{KH^{1-z}(t_2) - KH^{1-z}(t_1)}{(1-z) \cdot \mathcal{K} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4.19)$$

Zur Vereinfachung der Darstellung wurde hier

$$\mathcal{K} = \frac{Q_{10}^{\frac{T-T_{Ref}}{10}}}{1 + e^{(k_{rN} \cdot (\Delta[N]) - b_{rN})}}$$

gesetzt. Als Referenztemperaturen T_{Ref} wurde die mittlere Wachstumstemperatur der Versuchspflanzen eingesetzt (siehe Kattge, 2002). Im Respirationmodell wird der Mittelwert von $M_{rN,Ref}$ über alle Messungen verwendet.

Der Parametrisierungsvorgang wurde für eine Reihe von Exponenten z im Wertebereich zwischen 0 und 1 durchgeführt. Für jeden dieser Läufe wurde der Korrelationskoeffizient r berechnet (graphische Darstellung in Abbildung 4.1). Der höchste Wert für r ergab sich bei $z = 0,26$. Der sich dadurch ergebende Satz an Parametern ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.4: Parameter zur Beschreibung der Lichthemmung der respiratorischen Decarboxylierung im Blatt (Gleichung 4.8). k_1 , k_2 und k_4 sind einheitenlos; k_3 hat die Einheit $\text{m}^2 \text{s} \mu\text{E}^{-1}$.

Koeffizient	k_1	k_2	k_3	k_4
Wert	31,625	62,715	0,04272	0,625

Referenzstickstoffkonzentration. Die Referenzstickstoffkonzentration (siehe Text zu Gleichung 4.5) wird unabhängig vom Vegetationstyp auf $18,63 \text{ gN gC}^{-1}$ (mittlere N-Konzentration aller verwendeten Messdaten von Kattge, 2002) festgesetzt. Mit diesem Wert ließen sich bessere Korrelationen mit der gemessenen Respiration finden, als mit artspezifisch unterschiedlichen Werten (Daten nicht gezeigt).

Verringerung der Blattrespiration bei Licht Die Parameter k_1 bis k_4 aus Gleichung 4.8 wurden durch Anpassung der Funktion an 14 angenommene Werte (Tabelle 3.1) ermittelt. Die resultierenden in CABIN verwendeten Werte sind in Tabelle 4.4 angegeben.

4.1.3 Gleichungen des Speicherungsmodells

Das Speicherungsmodell reguliert die Bildung von Kohlenstoffreserven (siehe Abschnitt 3.1.7). Es regelt die Flüsse zwischen dem Assimilatpool $Assim$ und dem Pool der Reservekohlenhydrate $ResC$ (gC m^{-2}).

Der Speicherungsfluss von $Assim$ zu $ResC$ ($F_{As \rightarrow R}$, $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$) berechnet sich nach:

$$F_{As \rightarrow R} = \left(1 - \frac{Kap_A - Assim}{Kap_A}\right) \cdot \frac{Kap_R - ResC}{Kap_R} \cdot k_{As \rightarrow R,0} \cdot Assim \quad (4.20)$$

Hier steht Kap_A für die Kapazität des Assimilatpools und Kap_R für die des $ResC$ -Pools (beide gC m^{-2}). $k_{As \rightarrow R,0}$ (s^{-1}) ist der Speicherungsparameter, der mittels der beiden Kapazitätsterme, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen, skaliert wird.

Die Remobilisierung von gespeicherten Kohlenhydraten erfolgt, wenn die Poolgröße der löslichen Kohlenhydrate unter eine Schwelle sinkt. Diese Schwelle wird über das Produkt der relativen Schwelle k_{rem} und der Kapazität des Assimilatpools bestimmt. Der Remobilisierungsfluss $F_{R \rightarrow As}$ ($\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$) berechnet sich dann nach:

$$F_{R \rightarrow As} = \max\left(0, 1 - \frac{Assim}{k_{rem} \cdot Kap_A}\right) \cdot k_{R \rightarrow As,0} \cdot ResC^{0,07} \quad (4.21)$$

$k_{R \rightarrow As,0}$ (s^{-1}) ist der Remobilisierungsparameter, der durch den Kapazitätsterm skaliert wird. Der Exponent von 0,07 bei $ResC$ bewirkt, dass der Einfluss der Kohlenstoffreserven mit steigender Poolgröße zurück geht.

4.1.3.1 Berechnung der Kapazitäten

Die Kapazität des Assimilatpools wird als relativer Anteil der lebenden Phytomasse berechnet. Die Kapazität des $ResC$ -Pools wird als proportional zur nicht lebenden

Phytomasse angenommen, um die größeren Speicher holziger Pflanzen zu berücksichtigen:

$$Kap_A = k_{KapA} \cdot (C_{ha} + C_{wa,l} + C_{hb} + C_{wb,l}) \quad (4.22)$$

$$Kap_R = k_{KapR} \cdot (C_{wa} - C_{wa,l} + C_{wb} - C_{wb,l}) \quad (4.23)$$

k_{KapA} ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$) ist der Kapazitätsparameter für den Assimilatpool und k_{KapR} ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$) derjenige für den Reservepool. Ein l als Subskript zeigt an, dass nur der lebende Anteil eines Kompartimentes gemeint ist.

4.1.3.2 Parametrisierung

Unter der Annahme, dass Speicherung eine hohe Priorität im internen Kohlenstoffhaushalt der Vegetation hat, wurden die Werte für die Parameter des Speicherungs- und Remobilisierungsflusses auf $0,9 \text{ s}^{-1}$ ($k_{As \rightarrow R,0}$) und $0,1 \text{ s}^{-1}$ ($k_{R \rightarrow As,0}$) gesetzt.

Die Parameter zur Berechnung der Kapazitäten des Assimilat- und Kohlenhydratpools k_{KapA} und k_{KapR} wurden jeweils anhand von Messdaten an Blättern bestimmt. Diese Daten wurden der Literatur entnommen (siehe Abschnitt 3.1.7). Der Kapazitätsparameter des Assimilatpools k_{KapA} wurde gegenüber den Literaturwerten leicht erhöht auf $0,15 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$ gesetzt.

Der Wert für den entsprechenden Parameter des Reservepools k_{KapR} wurde aus Mangel an geeigneten Messwerten geschätzt. Es wurde dazu angenommen, dass die auf das tote Holz bezogene maximale Reservekohlenhydratmenge im Bereich der im lebenden Holz gemessenen maximalen Stärkekonzentration liegt. Newell et al. (2002) berichten hier für die tropischen Bäume *Urera caracasana* und *Anacardium excelsum* Stärkekonzentrationen in den äußeren Bereichen des Stammes von $0,11 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$. k_{KapR} wurde auf $0,10 \text{ gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1}$ gesetzt.

Die Remobilisierungsschwelle k_{rem} ist eine theoretische Größe und ist messtechnisch nicht erfassbar. Ein Wert für k_{rem} muss daher abgeschätzt werden. Da das Speicherungsmodell so gestaltet wird, dass die Bildung von Speicherkohlenhydraten eine hohe Priorität besitzt, wird ein Wert von $0,10$ (relativer Füllstand des Assimilatpools von 10%) eingesetzt.

4.1.4 Gleichungen des Allokationsmodells

Das Allokationsmodell beruht auf der Annahme, dass von der Respiration primär der Grundumsatz abgedeckt werden muss. Ist überschüssige Energie vorhanden, so wird diese zur Allokation verwendet (siehe Abschnitt 3.1.8).

Der Grundumsatz wird auf die in Abschnitt 3.1.8 beschriebenen Weise separat für das oberirdische krautige ($R_{G,ha}$) und unterirdische krautige Kompartimente ($R_{G,hb}$) bestimmt. Die lebenden Anteile der holzigen Kompartimente müssen nicht separat behandelt werden, da sie per Annahme (Abschnitt 3.1.6.3, Seite 30) die gleiche Stickstoffkonzentration wie die krautigen aufweisen und somit auch den selben massenbezogenen Grundumsatz haben. Der Gesamtgrundumsatz bezogen auf die lebende Phytomasse $R_{G,ges}$ ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) kann so über die Phytomassen berechnet werden:

$$R_{G,ges} = \frac{R_{G,ha}(C_{ha} + C_{wa,l}) + R_{G,hb}(C_{hb} + C_{wb,l})}{C_{ha} + C_{wa,l} + C_{hb} + C_{wb,l}} \cdot Q_{10}^{\left(\frac{T-T_{Ref}}{10}\right)} \quad (4.24)$$

Die Temperaturabhängigkeit wird wie in Abschnitt 4.1.2 (Gleichung 4.6) behandelt. Die Differenz von $R_{G,ges}$ und der Summe der Respiration aller Kompartimente R_{ges} ist nun die Respiration R_A ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$), die die Energie für Allokationsprozesse zur Verfügung stellt:

$$R_A = R_{ges} - R_{G,ges} \quad (4.25)$$

R_{ges} berechnet sich als die Summe der Respiration über alle Kompartimente (Gleichungen 4.9 bis 4.12), wobei sich für die oberirdische krautige Respiration eine Abweichung ergibt. Die Kohlenstoffabgabe wird dort bei Licht gehemmt (Gleichung 4.9), wodurch aber die Energiegewinnung in den Mitochondrien kaum beeinflusst wird (Abschnitt 3.1.6.2, Teil „Licht“ auf Seite 28). Da also die zur Verfügung stehende Energie nicht von der Strahlung beeinflusst wird, wird für die Berechnung von R_{ges} der Lichthemmungskoeffizient k_l aus Gleichung 4.9 auf 1 gesetzt.

Die Allokation $Allok$ ($\text{gC}_{\text{KH}} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$) ergibt sich nun aus R_A , solange dessen Wert positiv ist. Es wird dabei die weithin verwendete Annahme gemacht, dass für jedes veratmete C-Atom vier C-Atome in Strukturphytomasse eingebunden werden können (siehe Abschnitt 3.1.8):

$$Allok = \begin{cases} 4 \cdot R_A & \text{für } R_A > 0 \\ 0 & \text{für } R_A \leq 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

Die Allokation wird auf 90 % des Assimilatpools begrenzt (siehe Abschnitt 3.1.8).

Die Temperaturabhängigkeit der Allokation ergibt sich implizit aus der Temperaturabhängigkeit der Respiration (Gleichung 4.6) und des Grundumsatzes (Gleichung 4.24).

4.2 Prüfung der Teilmodelle

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Prüfung einzelner Teilmodelle von CABIN betrachtet. Geprüft wurde das Photosynthesemodell und das Respirationmodell sowie der Ansatz zur Bestimmung der Menge lebenden Gewebes im Holz.

4.2.1 Prüfung des Photosynthesemodells

In diesem Abschnitt wird die Fähigkeit des Photosynthesemodells von CABIN (Abschnitte 2.3 und 4.1.1) zur Reproduktion von Messdaten der Photosynthese geprüft. Das selbe wird mit dem Photosynthesemodell von Farquhar et al. (1980) durchgeführt und beide Modelle werden miteinander verglichen.

Die zum Vergleich verwendeten Messdaten stammen von Kattge (2002). Sie sind ein Teil derjenigen Daten, auf denen die ebenfalls von Kattge aufgestellten Stickstoffabhängigkeitsfunktionen der Modellparameter J_{max} und V_{cmax} (Gleichungen 2.6 und 2.7) beruhen. Bei der Prüfung der Photosynthesemodelle wurden gemessene Trockengewichte, Stickstoffgehalte, die interzelluläre CO_2 -Konzentration im Blatt und die Temperatur in der Messküvette berücksichtigt und die Respiration mit Hilfe einer einfachen Funktion abgezogen (siehe Abschnitt 3.4.1.1). Größen zur Bewertung der Modellergebnisse wurden wie in Anhang E beschrieben berechnet und sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Anhand der graphischen Darstellung in Abbildung 4.2 lässt sich erkennen, dass beide Modelle der Photosynthese ähnliche Ergebnisse bezüglich der Reprodukti-

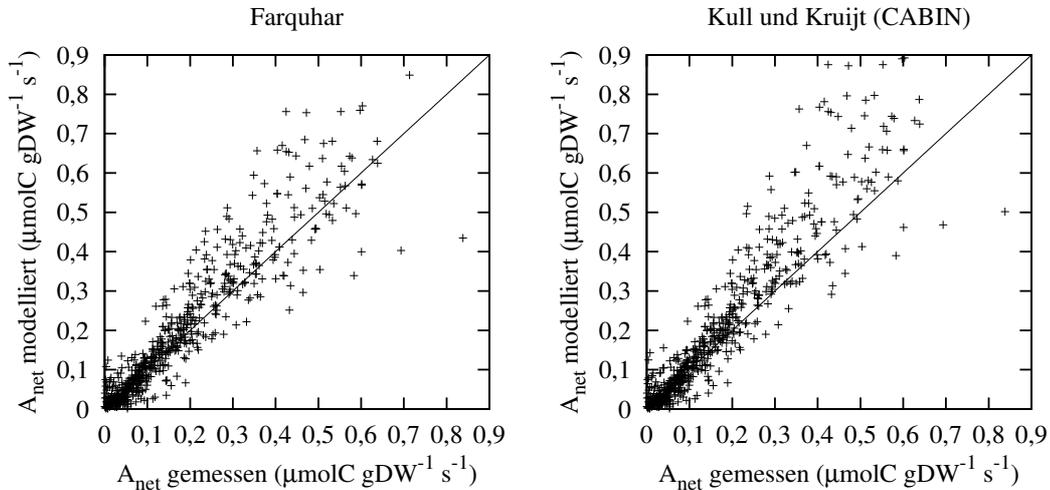


Abbildung 4.2: Vergleich der Photosynthesemodelle nach Farquhar et al. (1980) mit der für CABIN entwickelten Adaptation des Photosynthesemodells nach Kull und Kruijt (1998) anhand der Netto-photosynthese (A_{net}). Als Vergleichsdaten dienen Messdaten von Kattge (2002). Als Antriebsdaten wurden in beide Modelle von Kattge (2002) gemessene Werte des Trockengewichts, der Stickstoffkonzentration im Blatt, der Temperatur in der Messkuvette und der CO_2 -Konzentration im Blatt eingesetzt. Von der modellierten Bruttophotosynthese wurde zum Vergleich mit der gemessenen Nettophotosynthese die Respiration, wie sie mittels Gleichung 3.6 berechnet wurde, abgezogen. Die durchgezogene Linie ist eine eins-zu-eins-Linie.

Tabelle 4.5: Vergleich des Photosynthesemodells nach Farquhar et al. (1980) und der für CABIN entwickelten Adaptation des Photosynthesemodells nach Kull und Kruijt (1998) bezüglich ihrer Fähigkeit, die gemessene Photosynthese (Kattge, 2002) zu reproduzieren. Vergleichsgrößen: r – Korrelationskoeffizient; \overline{O} – Mittelwert der gemessenen Werte; \overline{M} – Mittelwert der modellierten Werte; SD_O – Standardabweichung der gemessenen Werte; SD_M – Standardabweichung der modellierten Werte; Offset – y -Achsenabschnitt der Regressionsgeraden; Steigung – Steigung der Regressionsgeraden; MAE – mittlerer absoluter Fehler; RMSE – mittlere Abstandsquadrate; RMSE_S – systematische mittlere Abstandsquadrate; RMSE_U – unsystematische mittlere Abstandsquadrate; d – Willmotts Übereinstimmungsindex (Willmott, 1982). Außer bei r , Steigung und d ist die Einheit $\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Größe	Photosynthesemodell	
	Farquhar	Kull und Kruijt
r	0,93	0,93
\overline{O}	0,17	0,17
\overline{M}	0,19	0,20
SD_O	0,15	0,15
SD_M	0,18	0,20
Offset	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$
Steigung	1,16	1,20
MAE	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
RMSE	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$
RMSE_S	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
RMSE_U	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
d	0,96	0,94

on gemessener Daten der netto Photosynthese liefern. Beide Photosynthesemodelle tendieren dazu, die Photosynthese mit steigenden Messwerten zunehmend zu überschätzen. Dies zeigt sich auch anhand der Steigung der Regressionsgeraden (Tabelle 4.5), die jeweils größer als 1 ist. der Y-Achsenabschnitt (Offset) liegt jeweils in der Größenordnung von 10^{-3} . Eine deutliche systematische Über- oder Unterschätzung findet also nicht statt. Dies zeigt sich auch an den mittleren Abstandsquadraten, bei denen der Wert der unsystematischen ($RMSE_U$) für beide Photosynthesemodelle größer als der der systematischen ($RMSE_S$) ist.

Beim Mittelwert der modellierten Werte ebenso wie bei deren Standardabweichung liegt das Photosynthesemodell von Farquhar näher an den Werten für die Messdaten. Der mittlere relative Fehler (MAE) und die mittleren Abstandsquadrate (RMSE) sind ebenfalls für das Photosynthesemodell von Farquhar etwas geringer, als für dasjenige von CABIN. Bezüglich des Korrelationskoeffizienten (r) ergeben sich gleiche Werte für beide Modelle der Photosynthese, bei Willmotts d schneidet wieder das Photosynthesemodell von Farquhar besser ab.

Insgesamt reproduziert das Modell der Photosynthese von Farquhar auf Blattebene die gemessenen Photosynthesedaten etwas besser, als das in CABIN verwendete von Kull und Kruijt. Die Resultate auf Blattebene lassen sich jedoch nicht direkt auf die Anwendung des Photosynthesemodells auf ganze Bestände übertragen.

4.2.2 Prüfung des Respirationsmodells

Bei der Parametrisierung des Respirationsmodells wurde anhand des Korrelationskoeffizienten entschieden, welcher Wert für den Exponenten z (Gleichung 4.4) eingesetzt wird (siehe Abschnitt 4.1.2.4). Diese Entscheidungsfindung wird hier mit Hilfe weiterer Methoden zur Bewertung der Reproduktion von Messdaten (Anhang E) geprüft. Verwendet wurden der mittlere absolute Fehler (MAE), die mittleren Abstandsquadrate (RMSE) und Willmotts Übereinstimmungsindex (d); sie sind in Abbildung 4.3 in Abhängigkeit vom Exponenten z dargestellt.

Das Minimum des MAE ergibt sich bei $z = 0,12$, das von RMSE liegt bei $z = 0,24$ und der höchste Wert von d tritt bei $z = 0,3$ auf. Diese Werte liegen um den ins Respirationsmodell eingesetzten Wert von $0,26$ (siehe Abschnitt 4.1.2.4), was diesen bestätigt.

Abbildung 4.4 zeigt den Vergleich der modellierten mit der von Kattge (2002) gemessenen Respiration unter der in Tabelle 4.3 angegebenen Parametrisierung. Hierzu wurden von Kattge erhobene Daten der Stickstoffkonzentration im Blatt und der Lufttemperatur in der Messküvette eingesetzt. Die verwendeten Kohlenhydratkonzentrationen wurden wie in Abschnitt 4.1.2.4 (Gleichung 4.17) beschrieben bestimmt. Der Korrelationskoeffizient zwischen Modell und Messung beträgt $r = 0,74$.

Während bei geringeren Werten der gemessenen Respiration eine recht gleichmäßige Streuung auftritt, tendiert das Respirationsmodell bei hoher Respiration eher dazu, diese zu unterschätzen.

4.2.3 Lebendes Gewebe im Holz

Ergebnisse des Ansatzes zur Berechnung der Menge lebenden Gewebes im Holz (Abschnitt 4.1.2.3, Gleichung 4.14) werden hier mit von Brosch (1990) an oberirdischem Holz (*Fraxinus excelsior* L.) gemessenen Daten verglichen. Im Mittel von sieben Messungen ermittelte Brosch einen Gehalt an lebendem Gewebe im Holz von

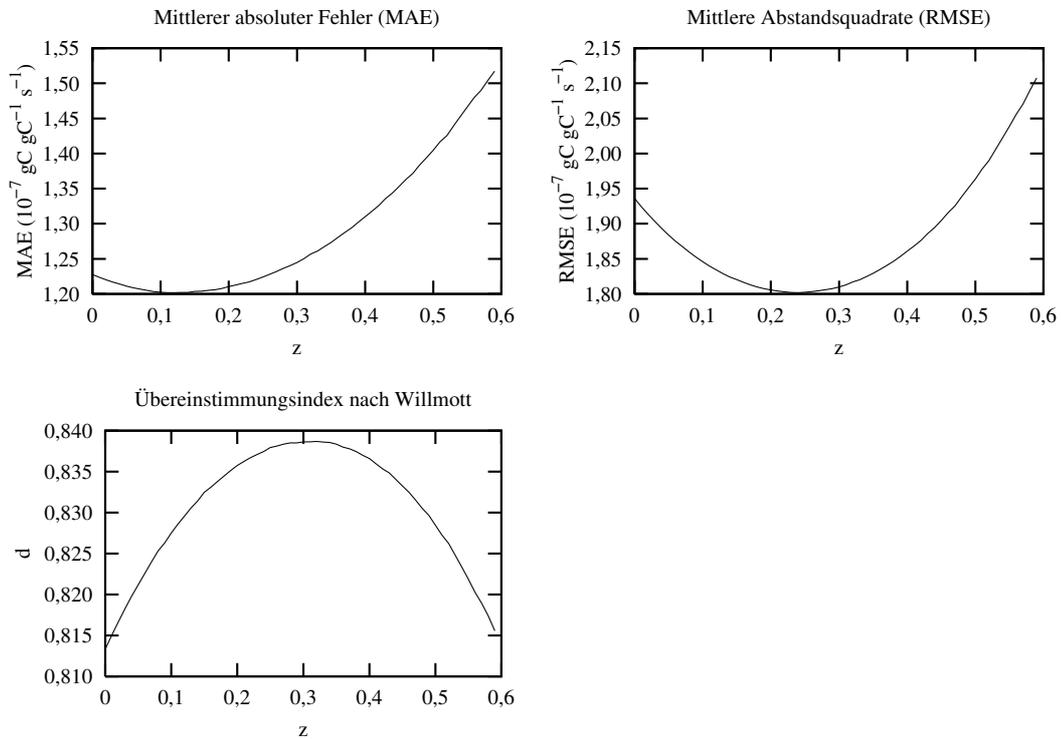


Abbildung 4.3: Zur Anpassung des Respiromodells an die Messdaten von Kattge (2002). Ergebnisse der Verwendung verschiedener Werte des Exponenten z (Gleichung 4.4) bei unterschiedlichen statistischen Methoden (Abschnitt E). MAE – Mittlerer absoluter Fehler; RMSE – Mittlere Abstandsquadrate; d – Willmotts Übereinstimmungsindex.

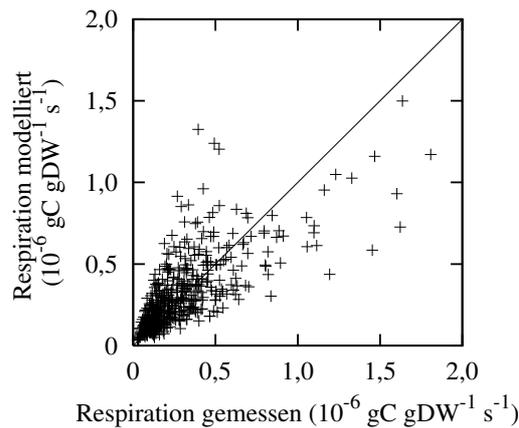


Abbildung 4.4: Vergleich der modellierten mit der gemessenen Respiration nach Kattge (2002) auf Blattebene. Parametrisierung des Respiromodells wie in Tabelle 4.3 angegeben. Als Antriebsdaten wurden von Kattge (2002) gemessene Daten der Stickstoffkonzentration im Blatt, der Lufttemperatur in der Messküvette eingesetzt. Die verwendeten Kohlenhydratkonzentrationen wurden wie in Abschnitt 4.1.2.4 (Gleichung 4.17) beschrieben bestimmt. Die durchgezogene Linie ist eine eins-zu-eins-Linie. Die Umrechnung der modellierten Respiration von Kohlenstoff- auf Trockenmassenbezug erfolgte auf Basis der Annahme von 45 % Kohlenstoffanteil an der Trockenmasse.

277,9 mg g⁻¹ bezogen auf das Trockengewicht (siehe Abschnitt 3.4.1.3). Basierend auf von HRBM berechneten Phytomassen und den Standard-C:N-Verhältnissen aus NCIM ergibt sich aus Gleichung 4.14 ein Wert von 319,1 mg g⁻¹ bezogen auf das Trockengewicht. Die Abweichung des Modellergebnisses von den Messungen beträgt demnach 14,8 %.

4.3 Prüfung von CABIN

CABIN wird in dieser Arbeit für einige ausgewählte Orte betrieben, für die Messdaten der NPP vorliegen (siehe Abschnitt 3.2). Alle für diese Arbeit mit CABIN durchgeführten Modellläufe wurden für diese Orte durchgeführt. Als Eingabe- und Zustandsdaten wurden durchgängig die in Abschnitt 3.3 angegebenen Daten verwendet.

Im Folgenden werden zunächst für zwei Beispielstationen einige Teilergebnisse vorgestellt (Abschnitt 4.3.1). In Abschnitt 4.3.2 folgen Resultate der Vergleiche von modellierten mit gemessenen NPP-Daten und Ergebnisse einer Untersuchung der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP.

4.3.1 Teilergebnisse

In diesem Abschnitt werden Teilergebnisse eines Laufs von CABIN bei Grundparametrisierung (siehe Abschnitte zur Parametrisierung der Teilmodelle) vorgestellt. Betrachtet werden die CO₂-Konzentration in den Interzellularen c_i , die Leitfähigkeit der Stomata g_s , die Photosynthese A_{ph} , die Respiration der Blätter R_{ha} und die Kohlenhydratpools. Zwei sehr unterschiedliche Stationen wurden als Beispiel ausgewählt: Station 1552 aus dem borealen Nadelwald und Station 80 aus dem tropischen Regenwald. Dargestellt werden Daten im steady state (siehe Fußnote auf Seite 35) vom 2. Juli (Station 80) bzw. 13. August (Station 1552) des vierten Jahres eines Modelllaufes (siehe Abschnitt 3.4.3.1).

CO₂-Konzentration im Blatt. Die CO₂-Konzentration im Blatt (c_i) wird für Station 1552 (borealer Nadelwald) zwischen 8 und 19 Uhr im Bereich zwischen 250 und 285 $\mu\text{l l}^{-1}$ berechnet (Abbildung 4.5 a). Für Station 80 (tropischer Regenwald) ergibt sich zwischen 5 und 17 Uhr ein c_i zwischen 250 und 300 $\mu\text{l l}^{-1}$ (Abbildung 4.6 a).

Unter günstigen Bedingungen (Temperatur zwischen Referenz- und Optimumstemperatur, Strahlung über 700 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Bodenwasserpotential über -1 MPa) zeigt Station 1552 im Jahresmittel ein c_i von 260 $\mu\text{l l}^{-1}$. Für Station 80 liegt dieser Wert bei 286 $\mu\text{l l}^{-1}$.

Leitfähigkeit der Stomata^a. Der Maximalwert der Leitfähigkeit der Stomata für Wasser liegt bei Station 1552 (borealer Wald) am 13. August mit etwa 32 $\text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei etwa einem Fünftel desjenigen bei Station 80 (tropischer Regenwald), der am 2. Juli etwa 84 $\text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ beträgt (Abbildungen 4.5 a und 4.6 a). Die im vierten Modelljahr erreichten Höchstwerte der stomatären

^aDie Einheiten unterscheiden sich von denen im Modell um mit Literaturangaben vergleichen zu können.

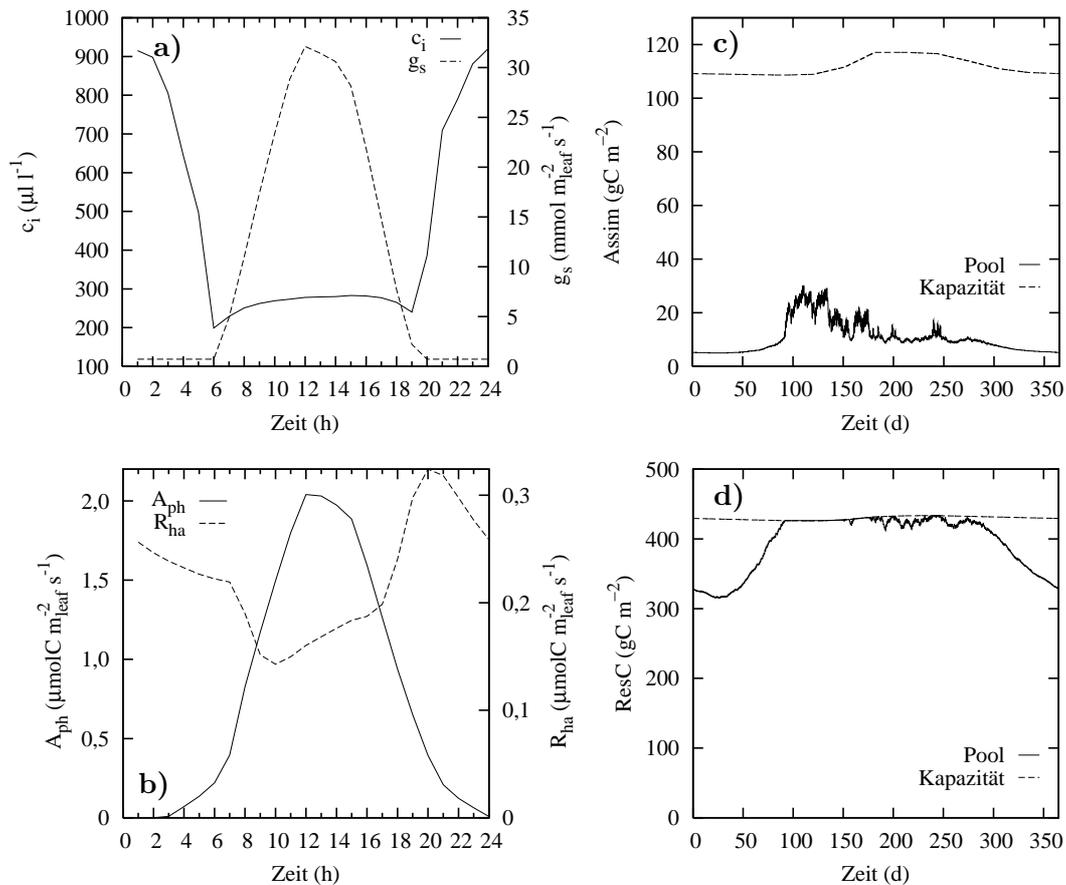


Abbildung 4.5: Teilergebnisse eines Modelllaufs für Station 1552 (borealer Wald) bei Grundparametrisierung. Links: (a) Tagesverlauf der interzellulären CO₂-Konzentration (c_i) und der Stomatalleitfähigkeit für Wasser (g_s) und (b) Tagesverlauf der Nettophotosynthese (A_{ph}) und der Dunkelrespiration (R_{ha}) des oberirdischen krautigen Phytomassekompartiments, jeweils für den 13. August des vierten Modelljahres (Modell im steady state). Rechts: Jahresverlauf der Kohlenhydratpools $Assim$ (c) und $ResC$ (d) mit den zugehörigen Kapazitäten (Daten ebenfalls aus dem vierten Modelljahr). Die Werte wurden für bessers Vergleichbarkeit mit Literaturdaten (siehe Abschnitt 5.2.1) auf Grundflächenbezug umgerechnet.

Leitfähigkeit liegen für Station 1552 bei $72 \text{ mmol m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und für Station 80 bei $99 \text{ mmol m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Photosynthese und Respiration^a. Der Tagesverlauf der mit CABIN berechneten Photosynthese A_{ph} und Respiration des oberirdischen krautigen Kompartiments R_{ha} ist in den Abbildungen 4.5 b (Station 1552) und 4.6 b (Station 80) gezeigt. Die maximale Photosynthese bei der Station im tropischen Regenwald am 2. Juli um 14 Uhr liegt bei $4,9 \mu\text{mol C m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$, während die der Station im borealen Wald am 13. August um 12 Uhr bei $2,0 \mu\text{mol C m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$ modelliert wird. Die Respiration der zweiten Nachtstunde ohne Strahlung ergibt sich für den tropischen Regenwald für die Stunde ab 21 Uhr mit $0,25 \mu\text{mol C m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Im borealen Wald beläuft sie sich für die Stunde ab 23 Uhr mit $0,27 \mu\text{mol C m}_{\text{leaf}}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Das Jahresmaximum der Photosynthese wird von CABIN für Station 80 mit

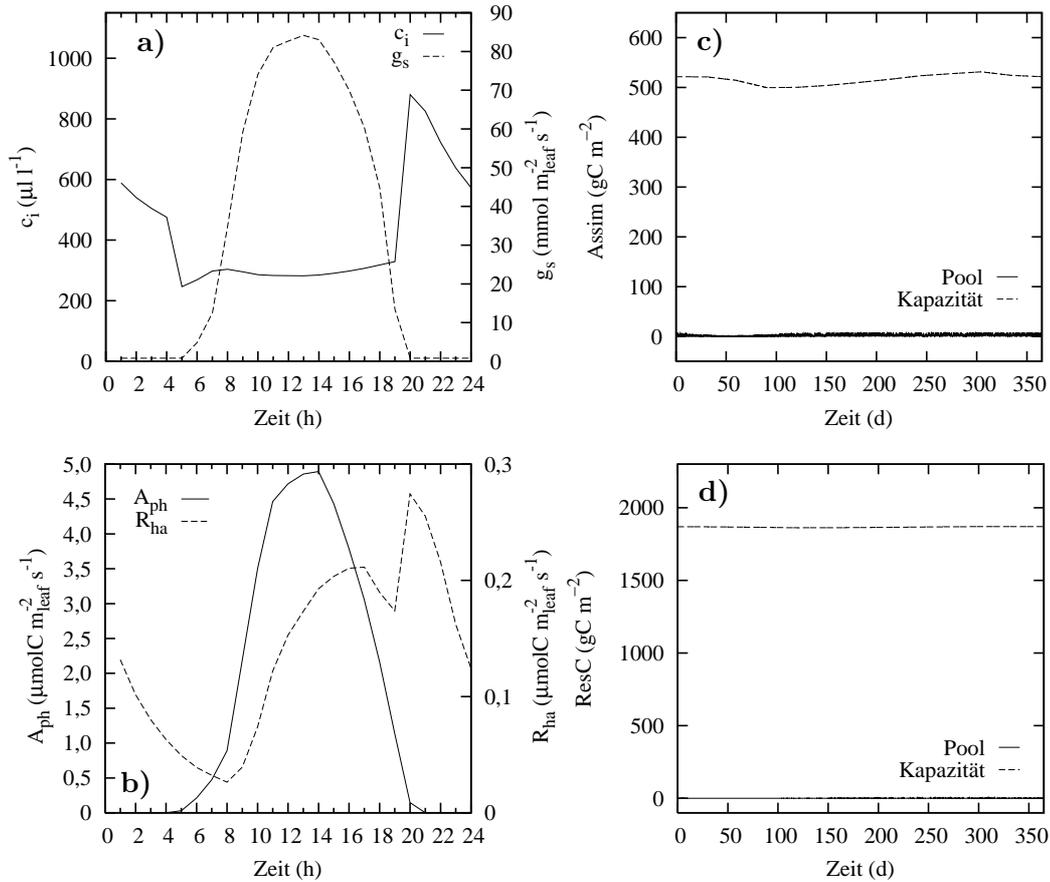


Abbildung 4.6: Teilergebnisse eines Modellaufs für Station 80 (tropischer Regenwald) bei Grundparametrisierung. Links: (a) Tagesverlauf der interzellularen CO₂-Konzentration (c_i) und der Stomataleitfähigkeit für Wasser (g_s) und (b) Tagesverlauf der Nettophotosynthese (A_{ph}) und der Dunkelrespiration (R_{ha}) des oberirdischen krautigen Phytomassekompartiments, jeweils für den 2. Juli des vierten Modelljahres (Modell im steady state). Rechts: Jahresverlauf der Kohlenhydratpools $Assim$ (c) und $ResC$ (d) mit den zugehörigen Kapazitäten (Daten ebenfalls aus dem vierten Modelljahr). Die Werte wurden für bessers Vergleichbarkeit mit Literaturdaten (siehe Abschnitt 5.2.1) auf Grundflächenbezug umgerechnet.

$6,5 \mu\text{molC m}^{-2} \text{leaf s}^{-1}$ und für Station 1552 mit $5,8 \mu\text{molC m}^{-2} \text{leaf s}^{-1}$ berechnet.

Kohlenhydratpools. Die modellierten Kapazitäten der Kohlenhydratpools für Station 80 im tropischen Regenwald liegen mit 500 gC m^{-2} bis 531 gC m^{-2} für die Assimilate und 1862 gC m^{-2} bis 1871 gC m^{-2} für die Reservekohlenhydrate etwa beim Zehnfachen der Kapazitäten der Station 1552 im borealen Wald, die für $Assim$ zwischen 109 gC m^{-2} und 117 gC m^{-2} und für $ResC$ zwischen 426 gC m^{-2} und 433 gC m^{-2} liegen (Abbildungen 4.5 c, d und 4.6 c, d). Im borealen Wald ist $ResC$ über weite Teile des Jahres nahezu vollständig gefüllt, während sich im Regenwald keine Reserven ansammeln. Der Assimilatpool sinkt im borealen Wald nicht unter einen Wert von 5 gC m^{-2} . In den Tropen liegt diese Untergrenze bei null.

In Tabelle 4.6 ist ein Überblick über mittlere jährliche Füllstände der Kohlenhydratpools (siehe Abschnitt 3.4.3.1, Gleichung 3.7) für alle Stationen gegeben. Die mittleren jährlichen Füllstände des Assimilatpools liegen zwischen 0,5 % und 11 %.

Ausschließlich bei der Steppenstation ergibt sich ein höherer Füllstand von 18 %. Die geringsten Füllstände weisen die Stationen im tropischen Regenwald mit 0,5 % und 1,2 % auf. Auch die Wüstenstation 737 liegt mit 0,8 % am unteren Ende des Spektrums. Die höchsten Füllstände treten bei der temperierten Station 991 und der Steppenstation auf. Abgesehen von den Stationen im tropischen Regenwald mit im Vergleich durchgängig geringen und den Stationen im borealen Wald mit im Vergleich durchgängig eher hohen Werten, ergeben sich bei allen Vegetationstypen, die mit mehreren Stationen vertreten sind, sowohl hohe als auch geringe Füllstände des Assimilatpools.

Für die Reservekohlenhydrate ergeben sich mittlere jährliche Füllstände von 0 % bis 100 %. Füllstände unter 1 % ergeben sich für alle tropischen Stationen und die Wüstenstation 737. Dies geht für all diese Stationen mit einer NPP von 0 oder 0,5 (Wüstenstation 737) einher. Füllstände im Bereich von 89 % bis 100 % ergeben sich für alle borealen und temperierten Wälder und die Steppenstation.

4.3.2 Abweichungen von der gemessenen NPP

In diesem Abschnitt wird die von CABIN berechnete NPP mit den NPP-Messdaten (siehe Abschnitt 3.2) verglichen. Auftretende Abweichungen werden auf Zusammenhänge und Korrelation mit Einflussgrößen untersucht. Außerdem werden Zusammenhänge und Korrelationen zwischen gefundenen Abweichungen und einigen Flüssen und Pools von CABIN betrachtet. Alle in diesem Abschnitt graphisch dargestellten Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Vergleicht man die modellierte NPP mit der gemessenen, so ergibt sich das in Abbildung 4.7 dargestellte Bild. Für zwei boreale Stationen (Stationspaar 1552/1556) und zwei temperierte Stationen (Stationen 991, 1009), die Trockenwaldstation und die Steppenstation überschätzt CABIN die Messwerte deutlich. Der umgekehrte Fall ergibt sich bei zwei der Savannen (Stationen 105, 271) und der Tundrastation. Für alle tropischen Regenwälder und die Station mit mediterraner Vegetation ergibt sich eine NPP von null.

Die Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP sind in geographischen Breiten unter 30° hauptsächlich negativ und in Breiten über 40° hauptsächlich positiv (Abbildung 4.8 a). Setzt man die Abweichungen in Beziehung zu den Klimagrößen mittlere Jahrestemperatur, Jahressumme der Niederschläge und Jahresmittel der PAR (Abbildung 4.8 b bis d), deutet sich jeweils eine negative Korrelation mit negativeren Werten der Abweichung bei steigenden Werten der Einflussgröße an. Die Korrelationskoeffizienten sind $r = -0,37$ für die Niederschläge, $r = -0,45$ für die Strahlung und $r = -0,58$ für die Temperatur. Die Temperatur wird demnach als die Klimagröße mit dem größten Einfluss auf die Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP interpretiert.

In Abbildung 4.9 ist der Quotienten aus Photosynthese und Respiration gegen die mittlere Jahrestemperatur aufgetragen ($r = 0,50$). Es zeigt sich, dass über das Jahr durchgängig mehr als 50 % des durch die (Brutto-)Photosynthese assimilierten Kohlenstoffs wieder veratmet werden. Betrachtet man nur die von holzigen Pflanzen dominierten Vegetationstypen (Tundra, Steppe, Savanne und Wüste werden vernachlässigt), so zeigt sich eine deutlichere Korrelation mit der mittleren Jahrestemperatur ($r = 0,86$). Mit zunehmender mittlerer Jahrestemperatur steigt also die Respiration stärker als die Photosynthese.

Um die Ursachen der Abweichungen näher zu betrachten, wurden die zentralen

Tabelle 4.6: Daten zum Vergleich von modellierter und gemessener NPP. Symbole: \bar{T}_{ann} – mittlere Jahrestemperatur, PP_{ann} – Jahressumme des Niederschlags, $I_{0,ann}$ – Jahresmittel der PAR, C_{ges} – Gesamtphytomasse, NPP – mit CABIN berechnete NPP, NPP_{ORNL} – gemessene NPP aus der ORNL-Datenbank (Olson et al., 2001), ΔNPP – Abweichung zwischen modellierter und gemessener NPP, $\frac{A_{ph}}{R_{ges}}$ – Verhältnis von Photosynthese zur gesamten Respiration der Vegetation, A_{ph} – Photosynthese, R_{ges} – Summe der Respiration aller Kompartimente, %Assim – Jahresmittel des relativen Füllstands des Assimilatpools, %ResC – Jahresmittel des relativen Füllstands des Reservepools. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Station	Vegetation	Lat (°)	\bar{T}_{ann} (°C)	$I_{0,ann}$ (W m ⁻²)	PP_{ann} (mm)	C_{ges} (gC m ⁻²)	NPP (gC m ⁻² a ⁻¹)	NPP_{ORNL} (gC m ⁻² a ⁻¹)	ΔNPP (gC m ⁻² a ⁻¹)	$\frac{A_{ph}}{R_{ges}}$	A_{ph} (gC m ⁻² a ⁻¹)	R_{ges} (gC m ⁻² a ⁻¹)	%ResC (%)	%Assim (%)
1594	Tu	69,37	-11,9	96,2	118,6	250	104,5	273	-168,5	0,52	214	110	70,6	9,5
1552	Bo	61,67	3,3	102,4	640,6	5042	1157,6	310	847,6	0,56	2613	1455	91,9	9,5
1556	Bo	62,07	3,3	101,7	640,6	5042	1101,6	335	766,6	0,56	2540	1439	91,3	9,1
1567	Bo	64,75	-2,8	117,2	268,3	2164	309,8	285	24,8	0,62	809	500	92,0	9,6
1009	Te	44,00	5,6	142,2	1091,8	5658	1060,5	540	520,5	0,57	2401	1341	98,8	10,1
991	Te	43,92	5,6	140,1	1091,8	6997	1234,3	540	694,3	0,54	2623	1389	99,3	10,8
709	Te	36,00	14,0	172,2	1317,3	13580	507,0	420	87,0	0,88	4377	3870	89,7	5,1
1379	Te	51,82	6,3	114,2	1069,0	22192	806,4	650	156,4	0,84	4311	3504	92,0	5,0
1377	Te	51,82	7,6	115,0	874,0	22192	562,7	710	-147,3	0,89	4297	3734	89,9	4,5
1184	Te	47,90	9,1	125,4	537,5	11335	561,9	510	51,9	0,81	2925	2364	90,1	5,4
773	Te	37,50	12,4	142,0	1785,1	8978	981,2	833	148,2	0,71	3419	2438	93,9	7,1
808	St	38,87	11,4	190,4	569,4	1656	1118,2	500	618,2	0,55	2536	1418	97,5	18,0
779	Me	37,91	17,9	181,2	391,9	3122	0,0	340	-340,0	1,00	747	747	14,1	2,0
105	Sa	15,33	28,1	220,3	405,0	392	113,3	320	-206,7	0,67	353	240	19,6	2,4
106	Sa	15,33	28,1	220,3	405,0	392	113,3	180	-66,7	0,67	353	240	19,6	2,4
164	Sa	24,18	22,0	245,1	757,4	599	409,4	350	59,4	0,54	860	450	65,2	9,4
271	Sa	26,28	26,3	235,0	358,0	301	120,4	690	-569,6	0,66	341	221	26,2	4,9
23	DF	-11,48	20,3	216,5	1244,0	7458	220,6	59	161,6	0,96	3694	3474	64,2	3,7
56	Tr	12,08	26,7	234,5	1705,6	19866	0,0	320	-320,0	1,00	4995	4995	0,0	0,5
80	Tr	7,58	27,1	212,5	2139,7	22109	0,0	935	-935,0	1,00	6090	6090	0,0	0,5
66	Tr	2,98	25,3	193,4	1807,0	17407	0,0	1015	-1015,0	1,00	6853	6853	0,1	1,2
65	Tr	2,98	25,3	193,4	1807,0	17407	0,0	1270	-1270,0	1,00	6853	6853	0,1	1,2
634	Dr	34,50	20,1	209,4	88,8	241	41,8	80	-38,2	0,60	104	62	29,6	5,6
737	Dr	36,67	16,8	236,5	144,0	204	0,5	30	-29,5	1,00	20	19	0,2	0,8
885	Dr	41,08	8,8	202,8	200,0	578	175,1	155	20,1	0,60	425	250	62,7	10,3

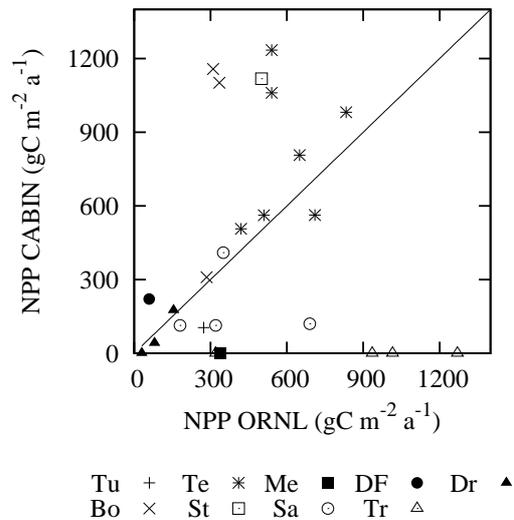


Abbildung 4.7: Vergleich von gemessener NPP (ORNL-Datenbank, siehe Abschnitt 3.2) und modellierter NPP bei mittlerer Parametrisierung des Speicherungsmodells. Die eingezeichnete Gerade ist die eins-zu-eins-Linie. Der Flächenbezug ist die Grundfläche. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Flüsse und Pools, nämlich Photosynthese und Respiration und die Kohlenhydratpools, in Beziehung zu den Abweichungen gesetzt (Abbildung 4.10). Betrachtet man nur die von holzigen Pflanzen dominierten Vegetationstypen, so kommt es mit steigender Photosynthese und Respiration zu negativeren Abweichungen. Nur die Station mit mediterraner Vegetation und die boreale Station 1567 weichen von diesem Zusammenhang ab. Die Korrelationskoeffizienten betragen bei Berücksichtigung aller Stationen $r = -0,38$ für die Photosynthese und $r = -0,54$ für die Respiration. Betrachtet man ausschließlich die von holzigen Pflanzen dominierten Vegetationstypen, liegt der Korrelationskoeffizient für die Photosynthese bei $r = -0,70$ und für die Respiration bei $r = -0,81$.

In Abbildung 4.10 c und d sind die Jahresmittel der relativen Füllstände der Kohlenhydratpools gegen die NPP-Abweichung aufgetragen. Für die Assimilate zeigt sich eine Korrelation, wobei zunehmend positivere Abweichungen mit höheren Füllständen einhergehen (Korrelationskoeffizient $r = 0,71$ für alle Stationen und $r = 0,86$ nur für Stationen von holzdominierten Vegetationstypen). Bei Füllständen unter 5 % treten nur negative, darüber überwiegend positive Abweichungen auf.

Auch für die Reservekohlenhydrate ergibt sich eine deutliche Korrelation mit positiveren Abweichungen bei höheren Füllständen ($r = 0,78$ für alle Stationen und $r = 0,85$ nur für Stationen von holzdominierten Vegetationstypen). Bei Füllständen unter 50 % treten ausschließlich negative und bei Füllständen über 50 % vorherrschend positive Abweichungen auf.

Es zeigte sich also ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP und den Jahresmitteln der relativen Füllstände der Kohlenhydratpools.

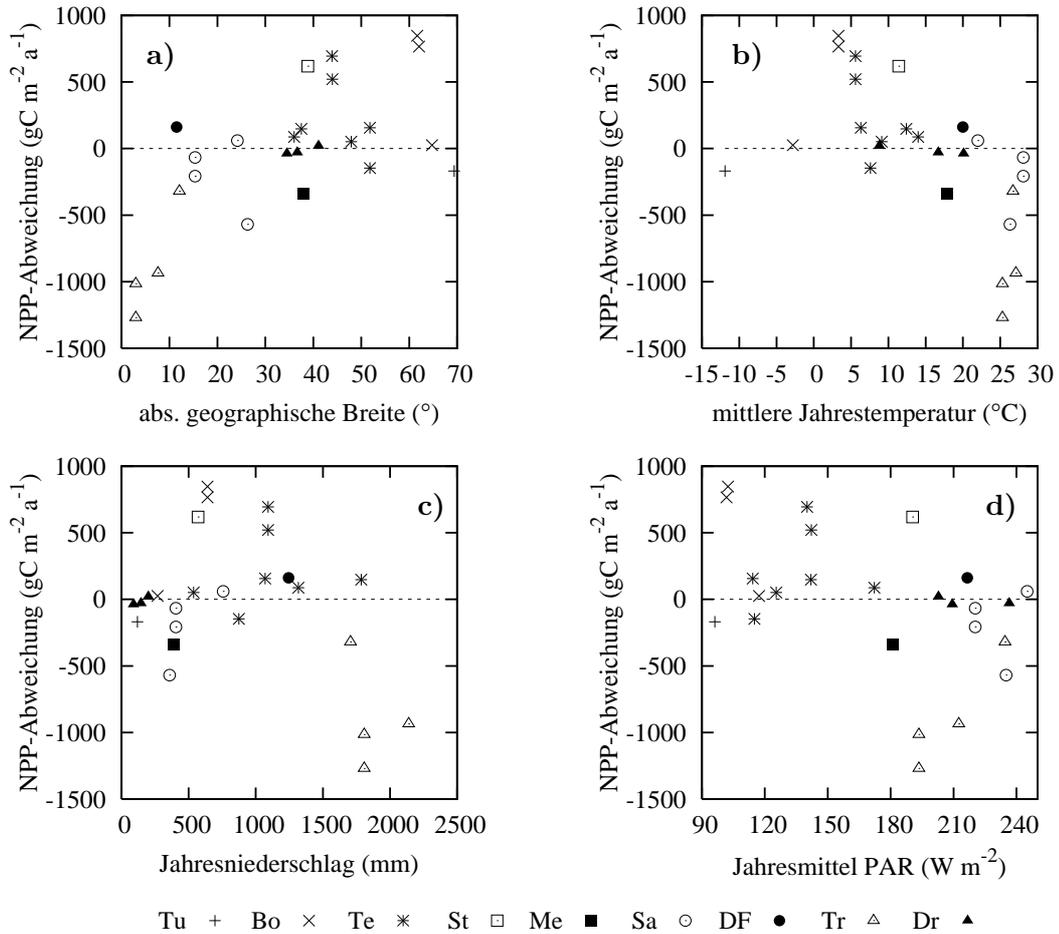
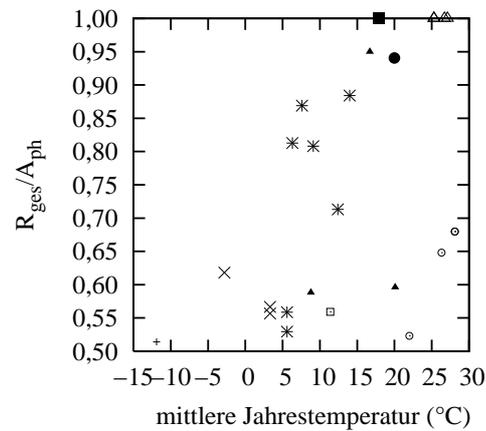


Abbildung 4.8: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP in Abhängigkeit von der geographischen Breite (a), der mittleren Jahrestemperatur (b), des Jahresniederschlags (c) und der jährlichen durchschnittlichen Strahlung (d). Ein positives Vorzeichen bedeutet: modellierte Werte höher als gemessene. Die geographische Breite ist ohne Vorzeichen aufgetragen. Der Flächenbezug ist die Grundfläche. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

4.4 Bedeutung der Parameter

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Bedeutung einzelner Parameter und Konstrukte (hier zur Vereinfachung allgemein als Parameter bezeichnet) für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels vorgestellt. Untersucht wurden die Parameter des Speicherungsmodells, die Stickstoffabhängigkeit von Respiration und Photosynthese, die Temperaturabhängigkeiten von Respiration und Photosynthese, die Menge lebenden Gewebes im Holz, der Grundumsatz und die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern. Zu jeder dieser Variierungskategorien wurden Modellläufe durchgeführt, bei denen die Werte der Parameter im plausiblen Wertebereich variiert wurden (siehe Abschnitt 3.4.4).

Es wurde jeweils der Einfluss der Variierung auf die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP (Abschnitt 4.4.1) und die Sensitivität von CABIN



Tu + Bo × Te * St □ Me ■ Sa ○ DF ● Tr △ Dr ▲

Abbildung 4.9: Quotient von Respiration R_{ges} zu Photosynthese A_{ph} in Abhängigkeit von der mittleren Jahrestemperatur. Der Flächenbezug ist die Grundfläche. Datenpunkte für Stationen von Vegetationstypen, die nicht von Holzigen Pflanzen dominiert sind, sind kleiner dargestellt. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

gegenüber der Variierung des Wertes des jeweiligen Parameters (Abschnitt 4.4.2) geprüft.

Als Eingabe- und Zustandsdaten wurden durchgängig die in Abschnitt 3.3 angegebenen Daten verwendet.

4.4.1 Abweichung von der gemessenen NPP

Die Abweichung der gemessenen von der modellierten NPP wird anhand des mittleren relativen Fehlers MRF (siehe Abschnitt 3.4.4.1) untersucht. Der MRF gibt die mittlere vorzeichenlose Abweichung der modellierten von den gemessenen NPP-Werten an. Außerdem wird untersucht, bei wievielen Stationen sich durch die Variierung der Parameter das Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP geändert hat.

4.4.1.1 Parameter des Speicherungsmodells

Wie in Abbildung 4.10 c und d gezeigt, korreliert die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP mit den Füllständen der Kohlenhydratpools. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Variierung der Werte der drei zentralen Parameter des Speicherungsmodells, nämlich der Kapazitätsparameter der Kohlenhydratpools k_{KapA} und k_{KapR} und der Remobilisierungsschwelle k_{rem} (Abschnitt 4.1.3), dargestellt. Die Grundlagen der Variierung sind in Abschnitt 3.4.4.3 beschrieben.

Für jeden der Parameter wurden die Werte gegenüber der Grundparametrisierung je einmal verringert und erhöht (Werte siehe Tabelle 3.7). Für alle 27 Kombinationen der Werte wurde ein Modelllauf durchgeführt. Die modellierte NPP sämtlicher Läufe finden sich in den Tabellen F.2 bis F.4 im Anhang F.

Zur Auswertung werden jeweils die geringsten bei den 27 Modellläufen zur Speicherparametrisierung auftretenden Werte des MRF (MRF_{min}) betrachtet und mit den MRF-Werten der Grundparametrisierung (MRF_{Ref} , bei mittleren Werten für

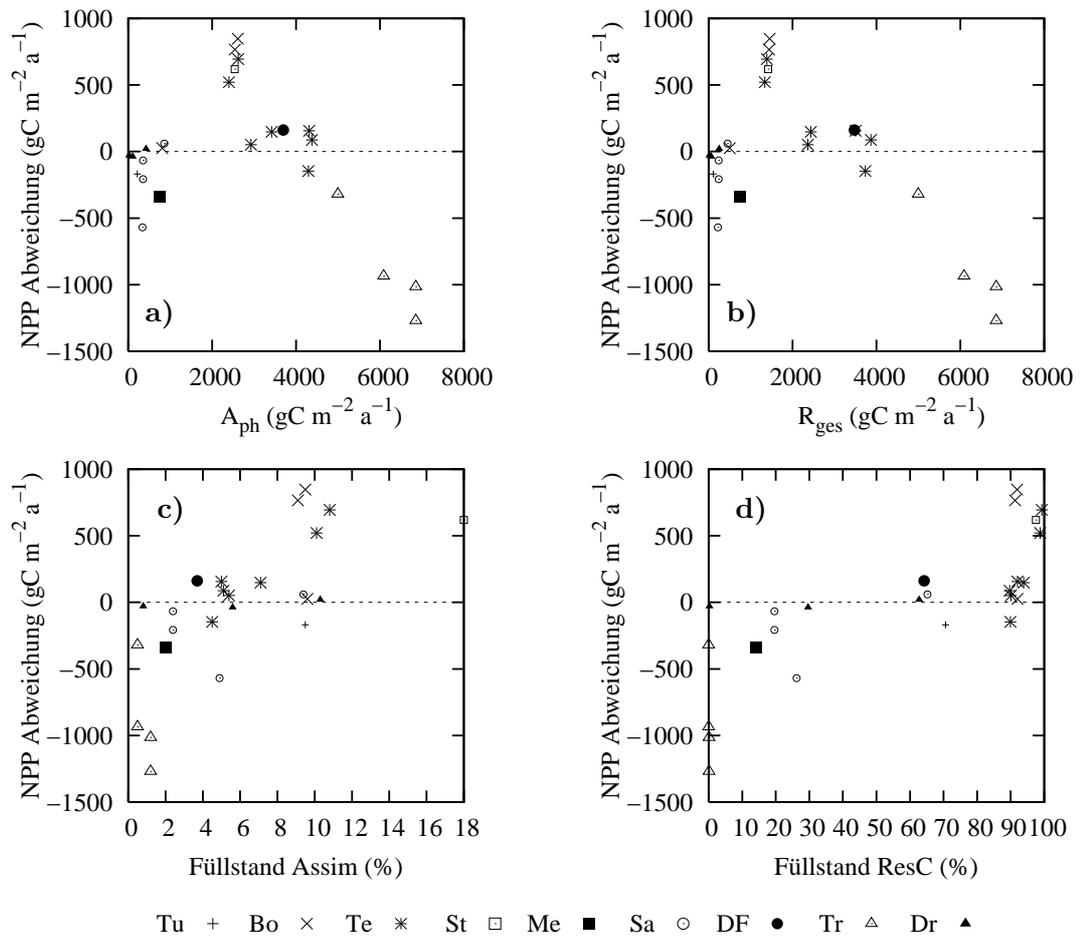


Abbildung 4.10: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP in Abhängigkeit von (a) der Photosynthese (A_{ph}), (b) der Gesamtrespiration (R_{ges}) und der Jahresmittel der Füllstände (c) des Assimilatpools Assim und (d) des Reservekohlenhydratpools ResC. Ein positives Vorzeichen bedeutet: modellierte Werte höher als gemessene. Datenpunkte für Stationen von Vegetationstypen, die nicht von holzigen Pflanzen dominiert sind, sind kleiner dargestellt. Der Flächenbezug ist die Grundfläche. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

die drei Parameter des Speicherungsmodells) verglichen. Dies wurde für jeden Vegetationstyp separat durchgeführt.

Die unter den Vegetationstypen geringsten Abweichungen mit einem MRF_{min} von 44,6% ergeben sich für den temperierten Wald (Tabelle 4.7). Der höchste MRF_{min} tritt beim borealen Wald mit 170,2% auf. Weitere Abweichungen über 100% finden sich bei der Steppe (123,5%) und dem Trockenwald (116,1%). Die MRF_{min} -Werte der anderen Vegetationstypen bewegen sich zwischen 49% und 100%.

Nur bei einer Station im temperierten Wald ergeben sich innerhalb der Spanne plausibler Werte der Parameter des Speicherungsmodells beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP (Tabelle 4.7).

Betrachtet man die Werte der Speicherparameter, bei denen die MRF_{min} -Werte für die einzelnen Vegetationstypen auftreten, so zeigt sich, dass dies für die borealen

Tabelle 4.7: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP für die Modellläufe mit variierten Werten der Parameter des Speicherungsmodells. Die Werte wurden jeweils einmal erhöht und verringert. Dargestellt ist der unter den 27 Modellläufen zur Parametrisierung des Speicherungsmodells kleinste aufgetretene mittlere relative Fehler MRF_{\min} , jeweils für die einzelnen Vegetationstypen und für die Gesamtheit aller Stationen. Zusätzlich sind die Werte der Parameter, bei denen MRF_{\min} auftritt (teilweise auch mehrere), und die MRF -Werte des Referenzlaufs (MRF_{Ref}) angegeben. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. Symbole: * – Wert tritt bei allen Werten für den entsprechenden Parameter auf. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Vegetation	MRF_{\min} (%)	k_{KapA} (gC_{KH})	k_{KapR} (gC^{-1})	k_{rem}	MRF_{Ref} (%)	VZ
alle	79,0	0,25	0,20	0,30	86,0	1/25
Tu	60,1	0,15	0,05	0,05	61,7	–
Bo	170,2	0,25	0,20	0,30	170,3	–
Te	44,6	0,25	0,20	0,30	45,5	1/7
St	123,5	0,15	0,20	0,30	123,6	–
		0,25	0,10	0,30		
Me	83,1	0,25	0,05	0,30	100,0	–
Sa	49,3	0,25	0,20	0,30	50,3	–
DF	116,1	0,25	0,20	0,30	273,9	–
Tr	100,0	*	*	*	100,0	–
Dr	52,0	0,25	0,20	0,30	53,0	–

und die temperierten Wälder, die Savannen, den Trockenwald und die Wüsten bei der Parametrisierung mit den hohen Werten für alle drei Speicherparameter der Fall ist. Für die Tundra ergibt sich MRF_{\min} bei geringen k_{KapR} und k_{rem} und mittlerem k_{KapA} , für die mediterrane Vegetation bei hohen k_{KapA} und k_{rem} aber geringen k_{KapR} und für die Steppen bei mittlerem k_{KapA} und hohem k_{KapR} und k_{rem} ebenso wie bei mittlerem k_{KapR} und hohen k_{KapA} und k_{rem} .

Für die Gesamtheit aller Stationen ergibt sich ein MRF_{\min} von knapp 80%. Dieser tritt bei hohen Werten für alle drei Speicherparameter auf.

Vergleicht man MRF_{\min} mit MRF_{Ref} , so zeigt sich, dass es abgesehen vom tropischen Regenwald für alle Vegetationstypen eine Wertekombination gibt, bei der MRF_{\min} geringer als MRF_{Ref} ist. Die deutlichste Verbesserung mit über 150 Prozentpunkten ergibt sich beim Trockenwald. Für alle anderen Vegetationstypen liegt die Verbesserung unter 17 Prozentpunkten, für den borealen und den temperierten Wald und für die Steppe sogar unter einem Prozentpunkt.

Extrema der modellierten NPP. Es werden nun die Extrema der modellierten NPP und die Parameterkombinationen, bei denen diese auftreten, betrachtet. In Tabelle 4.8 ist für jeden Vegetationstyp die Anzahl Stationen dargestellt, für die eine bestimmte Wertekombination der Parameter des Speicherungsmodells im Rahmen der 27 dazu durchgeführten Modellläufe zur maximalen bzw. minimalen modellierten NPP führt. Die Anzahlen wurden für jede Station bestimmt und über

Tabelle 4.8: Parameterkombinationen (Kapazitätsparameter des Assimilatpools k_{KapA} und des Reservepools k_{KapR} und Remobilisierungsschwelle k_{rem}) des Speicherungsmodells, die zu Extrema der modellierten NPP führen. Für jeden Vegetationstyp ist die Anzahl an Stationen dargestellt, für die eine Parameterkombination zur minimalen bzw. maximalen modellierten NPP unter den 27 Modellläufen zur Speicherparametrisierung führt. Durch Auswertung von gerundeten NPP-Werten können pro Station gleiche Extrema bei mehreren Wertekombinationen auftreten. N – Anzahl ausgewerteter Stationen. Die Spalten mit der Bezeichnung „ Σ “ zeigen die Gesamtzahl der jeweiligen NPP-Extrema unter dem jeweiligen k_{rem} .

		$k_{rem} = 0,05$				$k_{rem} = 0,1$				$k_{rem} = 0,3$			
		k_{KapA}			Σ	k_{KapA}			Σ	k_{KapA}			Σ
		0,07	0,15	0,25		0,07	0,15	0,25		0,07	0,15	0,25	
Tundra	k_{KapR}	0,05	0	1	0	0,05	1	0	0	0,05	0	0	0
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	1	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0
N=1					1				2				0
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	1	0,20	0	0	0
					0				1				0
Borealer Wald	k_{KapR}	0,05	2	0	0	0,05	1	0	0	0,05	0	0	0
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0
N=3					2				1				0
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	1	0,05	0	1	1	0,05	1	1	1
	k_{KapR}	0,10	0	1	1	0,10	1	1	3	0,10	1	1	3
	k_{KapR}	0,20	0	1	3	0,20	1	3	3	0,20	1	3	3
					7				14				15
Temperierter Wald	k_{KapR}	0,05	5	2	1	0,05	1	1	1	0,05	1	1	1
Maxima	k_{KapR}	0,10	2	1	1	0,10	1	1	1	0,10	1	1	1
	k_{KapR}	0,20	2	1	1	0,20	0	1	1	0,20	0	1	1
N=7					16				8				8
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	2	1	0,05	2	2	1
	k_{KapR}	0,10	0	1	1	0,10	0	2	1	0,10	2	2	1
	k_{KapR}	0,20	0	1	1	0,20	0	1	1	0,20	3	1	5
					4				9				19
Steppe, Prärie	k_{KapR}	0,05	1	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0
N=1					1				0				0
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	1	0,05	0	0	1	0,05	0	1	1
	k_{KapR}	0,10	0	0	1	0,10	0	1	1	0,10	1	1	1
	k_{KapR}	0,20	0	0	1	0,20	0	1	1	0,20	1	1	1
					3				5				8
Mediterrane Vegetation	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	1
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0
N=1					0				0				1
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
	k_{KapR}	0,10	1	1	1	0,10	1	1	1	0,10	1	1	0
	k_{KapR}	0,20	1	1	1	0,20	1	1	1	0,20	1	1	0
					6				6				4
Savanne	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	2	0,05	0	2	3
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	1	0,10	0	1	2
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	2
N=3					0				3				10
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	1	0	0,20	2	0	0	0,20	0	0	0
					1				2				0
Trockenwald	k_{KapR}	0,05	1	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0
N=1					1				0				0
Minima	k_{KapR}	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0
	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0	0	0
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	0	0,20	0	0	1
					0				0				1
Wüste	k_{KapR}	0,05	2	0	0	0,05	0	0	2	0,05	0	2	3
Maxima	k_{KapR}	0,10	0	0	0	0,10	0	0	1	0,10	0	1	2
	k_{KapR}	0,20	0	0	0	0,20	0	0	1	0,20	0	0	1
N=3					2				4				9
Minima	k_{KapR}	0,05	1	1	0	0,05	1	0	0	0,05	0	0	0
	k_{KapR}	0,10	1	2	0	0,10	1	0	0	0,10	1	0	0
	k_{KapR}	0,20	1	2	1	0,20	3	1	0	0,20	1	0	0
					9				6				2

den Vegetationstyp aufsummiert.

Allen Vegetationstypen ist gemein, dass Maxima eher bei geringem und Minima eher bei hohem k_{KapR} auftreten.

Für die Vegetationstypen borealer Wald, temperierter Wald, Steppe und Trockenwald treten die maximalen modellierten NPP-Werte am häufigsten bei der Kombination der jeweils geringsten Werte der drei Parameter auf. Minima finden sich für die genannten Vegetationstypen am häufigsten bei hohen Werten. Es treten jedoch häufig mehrere Kombinationen von Parametern auf, die zur gleichen minimalen Modell-NPP führen.

Die Savannen, Wüsten und die mediterrane Vegetation zeigen die maximale modellierte NPP am häufigsten bei hohem k_{rem} , k_{KapA} und k_{KapR} . Die Minima finden sich meist bei mittlerem oder geringem k_{rem} , mittlerem oder geringem k_{KapA} und hohem oder mittlerem k_{KapR} .

4.4.1.2 Ein Parametersatz für die weiteren Modellläufe

Die geringsten Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP treten bei den hohen Werten für alle drei Speicherparameter auf (siehe Abschnitt 4.4.1.1). Doch auch bei dieser Parametrisierung finden sich noch mittlere relative Fehler mit MRF-Werten im Bereich von 45 bis 170 % und die NPP der tropischen Regenwälder bleibt durchgängig null (Tabelle 4.7). Da die relative Variationsbreite, und damit der Einfluss der variierten Parameter auf die modellierte NPP, für die meisten anderen Variierungskategorien der Parametervariierungen jedoch um eine Größenordnung größer ist (siehe folgende Abschnitte), wurde bei der Entscheidung über den für die weiteren Modellläufe zu verwendenden Parametersatz die Priorität auf die Erhöhung der modellierten NPP der tropischen Regenwälder gelegt, da diese meist eine modellierte NPP von null aufweisen.

Aus diesem Grund wurde für die weiteren Modellläufe diejenigen Werte der Speicherparameter eingesetzt, bei denen die von holzigen Pflanzen dominierten Vegetationstypen die höchste Modell-NPP zeigen (siehe Tabelle 4.8). Dies ist am häufigsten bei den geringsten Werten der Speicherparameter der Fall. Es wurde also k_{KapA} auf 0,07, k_{KapR} auf 0,05 und k_{rem} auf 0,05 gesetzt.

4.4.1.3 Stickstoffabhängigkeit der Respiration

Die Stickstoffabhängigkeit der Respiration wird in CABIN mittels einer sigmoiden Funktion abgebildet (Gleichung 4.5). Die Werte der zwei enthaltenen Parameter k_{rN} und b_{rN} , sowie der Referenzwert des Koeffizienten M_{rN} ($M_{rN,Ref}$, Gleichung 4.6) wurden variiert, indem jeweils ein gegenüber der Grundparametrisierung höherer und geringerer Wert für die Parameter eingesetzt wurde (siehe Tabelle 3.8). Als Referenz wird der Modelllauf mit den geringsten Werten für die Speicherparameter (siehe Abschnitt 4.4.1.2) herangezogen. Die modellierten NPP-Werte aller ausgewerteten Modellläufe sind in Anhang F in den Tabellen F.5 und F.6 aufgelistet.

Bei der Betrachtung der Resultate dieser Modellläufe zeigte sich, dass einige Wertekombinationen dazu führen, dass sich extrem große Kohlenhydratpools einstellen, die teilweise ein Vielfaches der Phytomassen erreichen und so zu einem unrealistischen sich nicht stabilisierenden Modell führen (Daten nicht gezeigt). Aus diesem Grund wurden nur diejenigen Modellläufe in die Auswertung mit einbezogen, bei denen die Kohlenhydratpools nicht diejenigen Füllstände der Kohlenhydratpools

Tabelle 4.9: Parametrisierungen der N-Abhängigkeit der Respiration, die zu einem stabilen Modell führen. Angegeben sind die Wertekombinationen der Parameter aus den Gleichungen 4.5 (k_{rN} , empirisch bestimmter Parameter; b_{rN} , empirisch bestimmter Parameter) und 4.6 ($M_{rN,Ref}$, Referenzwert zur Berechnung des Maximalwerts des Respirationskoeffizienten). Die Symbole $-$, 0 und $+$ stehen für den geringen, mittleren und hohen Wert für den jeweiligen Parameter (siehe Tabelle 3.8).

$M_{rN,Ref}$	k_{rN}	b_{rN}	$M_{rN,Ref}$	k_{rN}	b_{rN}	$M_{rN,Ref}$	k_{rN}	b_{rN}
$-$	$-$	$-$	0	$+$	0	$+$	0	0
0	$-$	$-$	0	$+$	$+$	$+$	$+$	$-$
0	$-$	0	$+$	$-$	$-$	$+$	$+$	0
0	0	$-$	$+$	$-$	0	$+$	$+$	$+$
0	$+$	$-$	$+$	0	$-$			

überstiegen, die bei den Modellläufen in den anderen Variierungskategorien auftreten. Die 14 der 27 Wertekombinationen der Parameter der Stickstoffabhängigkeit der Respiration, bei denen dies der Fall ist, sind in Tabelle 4.9 aufgelistet. Die Ergebnisse dieser auswertbaren Läufe werden im Folgenden analysiert. Dabei wird MRF_{min} , der geringste unter den 14 ausgewerteten Modellläufen zur Stickstoffabhängigkeit der Respiration auftretende MRF-Wert, betrachtet.

Die Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration kann für jeden Vegetationstyp zu einer Verringerung des mittleren relativen Fehlers führen (Tabelle 4.10). Die deutlichste Verringerung tritt beim Trockenwald auf. Hier verringert sich der MRF um über 200 Prozentpunkte auf 329,4%, was jedoch auch der höchste der in dieser Variierungskategorie auftretenden MRF_{min} -Wert ist. Deutliche Verringerungen um 70 bzw. 76 Prozentpunkte treten bei der mediterranen Vegetation und den tropischen Regenwäldern auf. Dies führt hier zu den geringsten auftretenden MRF_{min} -Werten von 18,5% bzw. 23,8%. Die Verringerung bei den anderen Vegetationstypen liegt unter zehn Prozentpunkten.

Der MRF über die Gesamtheit aller Stationen verringert sich um 10,8 Prozentpunkte. Dies geschieht, wenn für alle drei Parameter die hohen Werte eingesetzt werden. Auch der MRF_{min} der borealen und temperierten Wälder und der Wüsten ergibt sich bei dieser Parametrisierung. Für Tundra und mediterrane Vegetation führt ein hoher Wert für $M_{rN,Ref}$ und geringe Werte für k_{rN} und b_{rN} zu MRF_{min} . Die Wertekombinationen, die bei den anderen Vegetationstypen den geringsten MRF verursachen treten jeweils nur einmal auf.

Beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP treten bei vieren der 25 Stationen auf. Dies ist bei drei Stationen im tropischen Regenwald, deren modellierte NPP im Referenzlauf bei null liegt, der Fall. Nur die Regenwaldstation 80 erreicht keine Abweichung mit positivem Vorzeichen, wobei auch diese Station eine modellierte NPP über null erreicht. Die vierte Station, bei der beide Vorzeichen auftreten, ist Station 1377 im temperierten Wald.

4.4.1.4 Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese

Die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese wird in CABIN über den Einfluss der Stickstoffkonzentration auf die maximale Elektronentransportrate und die maximale Carboxylierungsleistung der Rubisco beschrieben (siehe Abschnitt 2.3). Steigung

Tabelle 4.10: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP für die Modellläufe mit variierten Werten der Parameter der Stickstoffabhängigkeit der Respiration ($M_{rN,Ref}$ aus Gleichung 4.6, k_{rN} und b_{rN} aus Gleichung 4.5). Dargestellt ist der kleinste aufgetretene mittlere relative Fehler MRF_{min} , jeweils für die Gesamtheit aller Stationen und die einzelnen Vegetationstypen. Zusätzlich ist jeweils der MRF-Wert des Referenzlaufs (MRF_{Ref}) und der Parametersatz, bei dem MRF_{min} auftrat, angegeben. Dabei steht + für den hohen, 0 für den mittleren und – für den niedrigen der in Tabelle 3.8 für den jeweiligen Parameter angegebenen Werte. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Vegetation	MRF_{min} (%)	$M_{rN,Ref}$	k_{rN}	b_{rN}	MRF_{Ref} (%)	VZ
alle	87,8	+	+	+	98,6	4/25
Tu	57,5	+	–	–	60,6	–
Bo	170,4	+	+	+	175,0	–
Te	44,9	+	+	+	51,9	1/7
St	123,6	–	–	–	126,5	–
Me	18,5	+	–	–	89,0	–
Sa	41,3	+	+	0	50,4	–
DF	321,4	0	+	–	530,8	–
Tr	23,8	0	–	–	100,0	3/4
Dr	52,5	+	+	+	55,7	–

und y -Achsenabschnitt der dazu verwendeten linearen Funktionen (Gleichungen 2.6 und 2.7) wurden variiert. Der Ursprung der eingesetzten Werte ist in Abschnitt 3.4.4.5 beschrieben. Als Referenz wird der Modelllauf mit den geringsten Werten für die Speicherparameter (siehe Abschnitt 4.4.1.2) herangezogen. Die modellierten NPP-Werte aller ausgewerteten Modellläufe sind in Anhang F in den Tabellen F.7 und F.8 aufgelistet.

Durch die Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese kann mit Ausnahme der tropischen Regenwälder, deren modellierte NPP bei null bleibt, für alle Vegetationstypen der mittlere relative Fehler gegenüber dem Referenzlauf verringert werden (Tabelle 4.11). Die deutlichste Verringerung ergibt sich mit über 430 Prozentpunkten beim Trockenwald, der aber dennoch den höchsten in dieser Variierungskategorie auftretenden MRF_{min} -Wert aufweist. Die Verringerungen bei allen anderen Vegetationstypen bewegen sich unter 80 Prozentpunkten, für die Savannen und Wüsten sogar unter 4 Prozentpunkten.

Der geringste MRF_{min} findet sich mit 3,5 % bei der Tundra. Dies ist der geringste im Rahmen dieser Arbeit aufgetretene MRF. Ebenfalls geringe MRF_{min} ergeben sich mit 28,7 % bei den temperierten Wäldern, mit 43,9 % bei der mediterranen Vegetation und mit 48,3 % bei den Savannen. Alle übrigen Vegetationstypen zeigen Werte über 50 %.

Für die Gesamtheit aller Stationen, sowie für die temperierten Wälder, die Steppe und den Trockenwald tritt MRF_{min} bei Parametersatz 10 (siehe Tabelle 3.9) auf. Für die mediterrane Vegetation und die Savannen ist dies für Parametersatz 13 der Fall. Die Parametersätze, die bei den übrigen Vegetationstypen zu MRF_{min} führen, treten jeweils nur einmal auf.

Beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP

Tabelle 4.11: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP für die Modellläufe mit variierten Werten der Parameter der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese. Die eingesetzten Parametersätze und ihre Nummern sind in Tabelle 3.9 angegeben. Dargestellt ist der kleinste aufgetretene mittlere relative Fehler MRF_{min} , jeweils für die einzelnen Vegetationstypen und für die Gesamtheit aller Stationen. Zusätzlich ist jeweils die Nummer des Parametersatzes, bei dem MRF_{min} auftrat, und der MRF-Wert des Referenzlaufs (MRF_{Ref}) angegeben. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftraten. In Klammern ist dort die Anzahl Stationen angegeben, bei der dies nicht durch eine modellierte NPP von null verursacht wird. Symbole: * – Wert tritt bei allen Werten für den entsprechenden Parameter auf. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Vegetation	MRF_{min} (%)	Parametersatz	MRF_{Ref} (%)	VZ
alle	68,8	10	98,6	15(11)/25
Tu	3,5	3	60,6	1/1
Bo	98,0	4	175,0	3/3
Te	28,7	10	51,9	7(4)/7
St	80,1	10	126,5	1/1
Me	43,9	13	89,0	–
Sa	48,3	13	50,4	1/4
DF	98,3	10	530,8	1(0)/1
Tr	100,0	*	100,0	–
Dr	52,6	1	55,7	1/3

kommen bei 15 der 25 Stationen vor. Bei vier Stationen wird dieser jedoch dadurch verursacht, dass die modellierte NPP auf null fällt (siehe Tabelle F.7).

Beide Vorzeichen treten bei der Tundra, allen borealen Wäldern, allen temperierten Wäldern (bei dreien durch eine modellierte NPP von null), der Steppe, dem Trockenwald (modellerte NPP ist null) und bei je einer Savanne und Wüste auf.

4.4.1.5 Q_{10} der Respiration

Die Temperaturabhängigkeit der Respiration wird in CABIN mit einem Q_{10} -Ansatz beschrieben (siehe Gleichungen 4.6 und 4.24). Um die Bedeutung der Temperaturabhängigkeit der Respiration für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen zu untersuchen, wurde der Q_{10} um $\pm 0,5$ variiert. Die modellierten NPP-Werte sind in Anhang F in Tabelle F.9 aufgelistet.

Bei Erhöhung des Q_{10} der Respiration steigt der mittlere relative Fehler (MRF) über die Gesamtheit aller Stationen gegenüber dem Referenzlauf (Tabelle 4.12). Dies resultiert aus der Erhöhung des MRF beim borealen und temperierten Wald, dem Trockenwald und der Savannen. Für die Wüsten ergibt sich eine Erhöhung von weniger als 1%; bei Tundra und tropischem Regenwald kommt es zu keiner Veränderung. Nur bei Steppe und der mediterranen Vegetation verringert sich der MRF.

Die Verringerung des Q_{10} führt für die Gesamtheit aller Stationen zu einer Verringerung des MRF um über zehn Prozentpunkte gegenüber dem Referenzlauf. Dies

Tabelle 4.12: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP: mittlerer relativer Fehler (MRF) für die Modellläufe mit variierter Temperaturabhängigkeit und für den Referenzlauf (MRF_{Ref}). Variiert wurde der Q_{10} -Wert der Respiration um $\pm 0,5$, die Optimumstemperatur der Photosynthese (T_{opt}) um $\pm 30\%$ und die Referenztemperatur (T_{Ref}) um $\pm 5^\circ\text{C}$. Angaben jeweils für die einzelnen Vegetationstypen (Veget) und für die Gesamtheit aller Stationen. In den mit VZ bezeichneten Spalten ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. In Klammern ist dort die Anzahl angegeben, bei der dies nicht durch eine modellierte NPP von null verursacht wird. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

MRF (%)		Q_{10}			T_{opt} ($^\circ\text{C}$)			T_{Ref}		
Veget	MRF_{Ref}	+0,5	-0,5	VZ	+30%	-30%	VZ	+5 $^\circ\text{C}$	-5 $^\circ\text{C}$	VZ
alle	98,6	112,3	88,0	4/25	98,8	95,9	–	169,7	77,2	9(8)/25
Tu	60,6	60,6	63,8	–	60,7	61,1	–	60,1	66,3	–
Bo	175,0	189,5	152,2	1/3	175,3	173,2	–	229,4	98,9	1/3
Te	51,9	79,5	46,2	3/7	52,1	50,3	–	126,0	72,6	5/7
St	126,5	117,7	125,2	–	127,7	108,6	–	183,3	46,9	–
Me	89,0	80,1	99,4	–	88,2	86,5	–	64,4	100,0	–
Sa	50,4	54,4	45,3	–	49,8	62,8	–	43,6	64,1	1/4
DF	530,8	637,6	382,2	–	535,1	465,8	–	1687,0	100,0	1(0)/1
Tr	100,0	100,0	100,0	–	100,0	100,0	–	82,6	100,0	–
Dr	55,7	56,0	56,1	1/3	55,9	51,2	–	57,5	52,0	1/3

resultiert vor allem aus der deutlichen Verringerung des MRF des Trockenwaldes und des borealen Waldes. Der MRF erhöht sich mit der Q_{10} -Verringerung bei Tundra, mediterraner Vegetation und den Wüsten, wobei keine MRF-Erhöhung 10 Prozentpunkte übersteigt.

Bei nur fünf der untersuchten 25 Stationen ergeben sich in der Spanne der untersuchten Q_{10} -Werte beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP. Dies ist bei einer Station im borealen Wald, dreien im temperierten Wald und einer Wüstenstation der Fall.

4.4.1.6 Optimumstemperatur der Photosynthese

Die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese wird in CABIN für die maximale Carboxylierungs- und Elektronentransportrate mit einer Optimumsfunktion beschrieben (Gleichung 2.17). Die Lage des Temperaturoptimums, also die Optimumstemperatur T_{opt} , wird aus der Referenztemperatur hergeleitet (Abschnitt 4.1.1.1). Für die Untersuchung der Bedeutung der Temperaturabhängigkeit der Photosynthese für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen wurde T_{opt} je einmal um 30% erhöht und verringert. Die modellierten NPP-Werte sind in Anhang F in Tabelle F.9 aufgelistet.

Die Erhöhung der Optimumstemperatur der Photosynthese hat auf den mittleren relativen Fehler im Vergleich zum Referenzlauf keinen starken Einfluss (Tabelle 4.12). Für alle Vegetationstypen ergeben sich Änderungen des MRF gegenüber der Referenz von unter 5 Prozentpunkten. Abgesehen von der mediterranen Vegetation und der Savanne, bei denen eine leichte Verringerung des MRF gegenüber der Referenz auftritt, und abgesehen vom tropischen Regenwald, dessen modellierte NPP

auch bei der Erhöhung von T_{opt} bei null bleibt, zeigen alle Vegetationstypen bei Erhöhung der Optimumstemperatur höhere MRF-Werte, als beim Referenzlauf.

Die Verringerung der Optimumstemperatur um 30 % führt mit Ausnahme von Savanne und Tundra zu geringeren MRF-Werten, als beim Referenzlauf. Es ergibt sich jedoch für keinen Vegetationstyp ein mittlerer relativer Fehler, der unter 50 % liegt.

Die Variierung der Optimumstemperatur der Photosynthese ergibt bei keiner Station beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP.

4.4.1.7 Referenztemperatur

Über die Referenztemperatur T_{Ref} wird in CABIN die Temperaturabhängigkeit der Respiration (Gleichungen 4.6 und 4.24), der maximalen Carboxylierungs- und Elektronentransportrate der Photosynthese (Gleichung 2.17) und der kinetischen Parameter der Rubisco (Gleichung 2.16) beeinflusst. Außerdem wirkt sie auf die temperaturabhängigen Prozesse der Stomataregulation (siehe Esser und Hoffstadt, 2000). Sie wurde je einmal um 5°C erhöht und verringert. Die modellierten NPP-Werte sind in Anhang F in Tabelle F.9 aufgelistet.

Die Erhöhung der Referenztemperatur um 5°C führt für die Mehrheit der Vegetationstypen zu einer Erhöhung des mittleren relativen Fehlers gegenüber dem Referenzlauf (Tabelle 4.12). Dies resultiert in MRF-Werten über 120 % für die borealen Wälder, die temperierten Wälder, die Steppe und den Trockenwald. Letzterer zeigt mit einem MRF von 1687 % mehr als das Dreifache des MRF des Referenzlauf. Die MRF-Werte der übrigen Vegetationstypen liegen zwischen 43 % und 83 %. Verringerungen des MRF treten bei der Tundra, der mediterranen Vegetation und den Savannen und besonders auch beim tropischen Regenwald auf. Über die Gesamtheit aller Stationen betrachtet ergibt sich bei T_{Ref} -Erhöhung eine Erhöhung des MRF um über 70 Prozentpunkte.

Bei der Verringerung der Referenztemperatur um 5°C verringert sich der MRF für die Gesamtheit aller Stationen um über 20 Prozentpunkte. Deutliche Verringerungen ergeben sich beim borealen Wald und der Steppe, deren MRF-Werte unter 100 % sinken. Für den Trockenwald und die Station mit mediterraner Vegetation sinkt die modellierte NPP durch die Verringerung der Referenztemperatur auf null.

Der geringste auftretende mittlere relative Fehler ist im Rahmen der Variierung der Referenztemperatur mit 43,6 % bei den Savannen nach Erhöhung von T_{Ref} zu finden.

Im Bereich der plausiblen Werte für T_{Ref} ergeben sich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP bei neun der 25 untersuchten Stationen. Dies ist bei jeweils einer der Wüstenstationen, der Savannen, und der borealen Wälder der Fall. Beim Trockenwald ergibt sich das negative Vorzeichen durch eine modellierte NPP von null. Bei den sieben untersuchten Stationen im temperierten Wald ergeben sich fünf mal beide Vorzeichen.

4.4.1.8 Lebendes Gewebe im Holz

Die im Respirationmodell von CABIN berechnete Menge lebenden Gewebes im Holz (siehe Abschnitt 4.1.2.3) wurde im Rahmen der Parametervariierung variiert. Die Menge wurde um 20 % und 40 % verringert, so dass 80 % und 60 % der ursprünglichen

Tabelle 4.13: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP: mittlerer relativer Fehler MRF für die Modellläufe mit variierter Menge lebenden Gewebes im Holz und für den Referenzlauf (MRF_{Ref}, verbleibende Menge 100 %). Angaben jeweils für die einzelnen Vegetationstypen und für die Gesamtheit aller Stationen. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

MRF (%)	verbleibende Menge lebenden Gewebes			VZ
	100 %	80 %	60 %	
Vegetation	100 %	80 %	60 %	VZ
alle	98,6	141,2	187,1	–
Tu	60,6	57,9	55,1	–
Bo	175,0	211,5	249,0	–
Te	51,9	104,1	161,9	–
St	126,5	129,2	148,2	–
Me	89,0	81,9	73,8	–
Sa	50,4	49,5	48,6	–
DF	530,8	1126,8	1858,8	–
Tr	100,0	100,0	70,7	–
Dr	55,7	58,0	61,1	–

Menge verblieben (siehe Abschnitt 3.4.4.7). Die modellierten NPP-Werte aller Läufe sind im Anhang F in Tabelle F.10 aufgelistet.

Durch die Verringerung der Menge lebenden Gewebes im Holz steigt der mittlere relative Fehler für die borealen und temperierten Wälder, den Trockenwald, die Steppe und die Wüsten (siehe Tabelle 4.13). Für die übrigen untersuchten Vegetationstypen ergibt sich eine sinkende Tendenz.

Die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP wird mit sinkender Menge lebenden Gewebes im Holz mit Ausnahme der Wüstenstation 737 und der tropischen Wälder für jede einzelne Station positiver (siehe Tabelle F.10). Das Stationspaar 65/66 im tropischen Regenwald zeigt erst bei der Verringerung der Menge lebenden Gewebes auf 60 % der ursprünglichen Menge eine deutlich positive Modell-NPP.

Durch die Variierung der Menge lebenden Gewebes im Holz ergeben sich für keine Station beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP.

4.4.1.9 Grundumsatz

Der mittels Gleichung 3.1 berechnete Grundumsatz des lebenden Gewebes wurde mit Hilfe eines in der Gleichung ergänzten Multiplikators variiert. Für den Multiplikator wurden Werte zwischen 0,5 und 2,0 eingesetzt (siehe Abschnitt 3.4.4.8). Die modellierten NPP-Werte der Modellläufe zur Variierung des Grundumsatzes finden sich in Tabelle F.10.

Betrachtet man den mittleren relativen Fehler, so zeigt sich, dass die geringsten Werte für die verschiedenen Vegetationstypen bei unterschiedlichen Werten

Tabelle 4.14: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP: mittlerer relativer Fehler (MRF) für die Modellläufe mit variierten Werten eines Multiplikators, der auf den Grundumsatz angewandt wurde. Für den Referenzlauf ist der Multiplikator mit dem Wert 1 angegeben. Angaben jeweils für die einzelnen Vegetationstypen und für die Gesamtheit aller Stationen. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. In Klammern ist dort die Anzahl angegeben, bei der dies nicht durch eine modellierte NPP von null verursacht wird. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

MRF (%)	Grundumsatzmultiplikator						VZ
	$\frac{1}{0,5}$	$\frac{1}{0,75}$	1	$\frac{1}{1,5}$	$\frac{1}{1,75}$	$\frac{1}{2,0}$	
Vegetation							
alle	77,0	71,4	98,6	182,6	219,6	258,9	18(17)/25
Tu	84,8	68,6	60,6	53,6	51,1	49,0	–
Bo	32,9	124,7	175,0	248,7	270,9	288,5	2/3
Te	83,9	52,0	51,9	153,0	188,9	221,4	7/7
St	8,3	65,4	126,5	184,4	203,1	220,1	1/1
Me	100,0	98,5	89,0	41,8	23,8	13,6	–
Sa	80,3	55,7	50,4	44,2	42,4	43,5	2/4
DF	100,0	30,5	530,8	1777,1	2355,6	2771,2	1/1
Tr	100,0	100,0	100,0	85,3	93,5	162,3	4(3)/4
Dr	74,7	54,1	55,7	57,5	59,3	60,4	1/3

des Grundumsatzmultiplikators auftreten (Tabelle 4.14). Der geringste MRF zeigt sich mit 8,3% für die Steppe bei der Verdoppelung des Grundumsatzes. Der nächst höhere auftretende MRF ergibt sich für die Station mit mediterraner Vegetation mit 13,6% am anderen Ende des Spektrums der eingesetzten Multiplikatoren, nämlich bei der Halbierung des Grundumsatzes. Für die anderen Vegetationstypen liegen die jeweils für sie geringsten MRF-Werte (in aufsteigender Reihenfolge) für den Trockenwald (MRF = 30,5%) bei einem Multiplikator von $\frac{0}{1,75}$, für den borealen Wald (32,9%) bei Verdoppelung des Grundumsatzes, für die Savanne (42,4%) bei einem Multiplikator von $\frac{1}{1,75}$, für die Tundra (49,0%) bei Halbierung des Grundumsatzes, für den temperierten Wald (51,9%) ohne Veränderung des Grundumsatzes (Multiplikator 1), für die Wüste (54,1%) bei einem Multiplikator von $\frac{1}{0,75}$ und für den tropischen Regenwald (85,3%) bei einem Multiplikator von $\frac{1}{1,5}$. Der für die Gesamtheit aller Stationen geringste auftretende MRF findet sich mit 71,4% bei einem Multiplikator von $\frac{1}{0,75}$.

Für 18 der 25 untersuchten Stationen ergeben sich im Rahmen der Variierung des Grundumsatzes beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP. Dies ist für sämtliche Stationen im temperierten und tropischen Wald, den Trockenwald, die Steppe, zwei von drei Stationen im borealen Wald, eine Wüstenstation und zwei von vier Savannen der Fall. Bei Station 80 im tropischen Regenwald ergibt sich das negative Vorzeichen durch eine modellierte NPP von null.

Tabelle 4.15: Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP: mittlerer relativer Fehler (MRF) für die Modellläufe mit verringerter Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern und für den Referenzlauf (MRF_{Ref} , $s = 1,00$). Variiert wurde die relative Füllstandsschwelle s des Assimilatpools über der die Photosynthese herunter reguliert wird. Angaben jeweils für die einzelnen Vegetationstypen und für die Gesamtheit aller Stationen. In der mit VZ bezeichneten Spalte ist der Anteil Stationen des jeweiligen Vegetationstyps angegeben, bei dem im untersuchten Wertebereich beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

MRF (%) Vegetation	relative Füllstandsschwelle			VZ
	$s = 1,00$	$s = 0,75$	$s = 0,50$	
alle	98,6	98,6	98,3	–
Tu	60,6	60,7	62,1	–
Bo	175,0	175,0	174,5	–
Te	51,9	51,9	51,9	–
St	126,5	126,5	120,8	–
Me	89,0	89,0	89,0	–
Sa	50,4	50,4	50,2	–
DF	530,8	530,8	530,8	–
Tr	100,0	100,0	100,0	–
Dr	55,7	55,7	55,6	–

4.4.1.10 Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern

Abschließend wurde der Prozess der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern (siehe Abschnitte 3.1.5 und 4.1.1.2) zusätzlich in CABIN eingeführt. Die relative Füllstandsschwelle s des Assimilatpools, bei deren Überschreitung die maximale Carboxylierungsleistung und Elektronentransportrate verringert wird (siehe Gleichung 4.3), wurde jeweils einmal auf 0,5 und 0,75 gesetzt, wodurch die Verringerung der Photosynthese ab einem Füllstand von 50 % bzw. 75 % einsetzt. Die modellierten NPP-Werte der Modellläufe zur Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern finden sich in Tabelle F.9 in Anhang F.

Die auftretenden mittleren relativen Fehler zeigen einen geringen Einfluss der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern auf die modellierte NPP (Tabelle 4.15). Nur bei $s = 0,5$ zeigen sich Änderungen von über 0,1 Prozentpunkten gegenüber dem Referenzlauf. Die temperierten Wälder, die mediterrane Vegetation, der Trockenwald und die tropischen Wälder zeigen keinerlei Änderung. Leichte Verringerungen finden sich bei den borealen Wäldern, den Savannen und den Wüsten. Einzig bei der Steppe ergibt sich mit 5,7 Prozentpunkten eine Verringerung mit einem Betrag größer eins. Eine Erhöhung des MRF tritt nur bei der Tundrastation auf.

Entsprechend den geringen Änderungen des MRF gegenüber dem Referenzlauf, treten auch nirgends beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP.

Tabelle 4.16: Mittlere relative Variationsbreiten (RVB, Verhältnis der Differenz der höchsten und geringsten modellierten NPP zur gemessenen NPP) in allen Variierungskategorien über alle Stationen eines Vegetationstyps und über die Gesamtheit aller Stationen. Variierungskategorien: R_G – Grundumsatz; A_{ph-N} – Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese; T_{Ref} – Referenztemperatur; $R-N$ – Stickstoffabhängigkeit der Respiration; $C_{w,l}$ – Menge lebenden Gewebes im Holz; Speicher – Parameter des Speicherungsmodells; T_{opt} – Optimumtemperatur der Photosynthese; Q_{10} – Temperaturabhängigkeit der Respiration; k_{Assim} – Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

RVB (%)	Vegetation									
	alle	Tu	Bo	Te	St	Me	Sa	DF	Tr	Dr
R_G	311,3	35,8	309,2	305,2	228,4	86,4	67,2	2871,2	262,3	59,2
A_{ph-N}	235,5	125,0	447,5	286,9	369,0	56,1	86,1	1338,1	0,0	101,5
T_{Ref}	151,6	6,2	152,9	158,4	136,3	35,6	38,9	1787,0	17,4	10,3
$R-N$	130,8	3,7	68,5	129,6	65,3	75,5	21,8	1462,0	103,9	15,9
$C_{w,l}$	101,7	5,5	74,0	110,0	21,7	15,2	7,9	1328,0	29,3	10,3
Speicher	26,3	1,7	5,3	15,2	2,9	16,9	13,8	414,8	0,0	15,0
T_{opt}	24,4	3,1	29,2	42,5	2,5	11,2	4,4	152,9	0,0	12,4
Q_{10}	15,7	0,0	14,5	27,6	8,8	8,9	4,1	106,8	0,0	5,2
k_{Assim}	0,4	1,4	0,5	0,0	5,7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,5

4.4.2 Sensitivität von CABIN

Zur Beurteilung der Sensitivität von CABIN gegenüber der Variierung eines Parameters wird die relative Variationsbreite (RVB) verwendet. Die RVB ist das Verhältnis der Spanne im Rahmen einer Variierungskategorie aufgetretener Werte der Modell-NPP zur gemessenen NPP, gemittelt über eine Gruppe von Stationen (siehe Abschnitt 3.4.4.2). Je höher die RVB ist, desto weiter ist die Spanne an modellierten NPP-Werten, die im Bereich der eingesetzten plausiblen Parameterwerte erreicht werden kann. Tabelle 4.16 fasst die RVB-Werte der für diese Arbeit untersuchten Variierungskategorien zusammen.

Über die Gesamtheit aller Stationen betrachtet ergibt sich die höchste RVB mit einem Wert von 311,3 % für die Variierung des Grundumsatzes. Weitere Variierungskategorien mit RVB-Werten über 100 % sind (in absteigender Reihenfolge) die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese (235,5 %), die Referenztemperatur (151,6 %), die Stickstoffabhängigkeit der Respiration (130,8 %) und das lebende Gewebe im Holz (101,7 %). Die RVB der übrigen Variierungskategorien liegt unter 30 %. Die geringste RVB ist bei der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern mit einem RVB-Wert von 0,43 % zu finden.

Für keinen der untersuchten Vegetationstypen ergibt sich die Rangfolge der RVB genauso wie für die Gesamtheit aller Stationen. So hat die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese bei fünf der neun untersuchten Vegetationstypen die höchste RVB, während sie für die Gesamtheit aller Stationen hinter dem Grundumsatz nur den zweiten Rang belegt.

Die ersten drei Ränge in der RVB-Rangfolge der Variierungskategorien werden, wenn auch in unterschiedlicher Folge, auch bei fünf der neun untersuchten Vegetationstypen von Grundumsatz, Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese und Refe-

renztemperatur belegt. Hier weichen die mediterrane Vegetation, der Trockenwald, der tropische Regenwald und die Wüste ab. Bei diesen Vegetationstypen ersetzt die Stickstoffabhängigkeit der Respiration die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese oder die Referenztemperatur in den ersten drei Rängen. Beim Trockenwald zeigt auch die Menge lebenden Gewebes im Holz eine höhere RVB, als die letztgenannten Variierungskategorien. Der Grundumsatz liegt bei allen Vegetationstypen unter den ersten drei RVB-Rängen.

Kapitel 5

Diskussion

Im Kapitel Diskussion werden in Abschnitt 5.1 zunächst die in CABIN umgesetzten Neuerungen vorgestellt. In Abschnitt 5.2 wird dann die Leistungsfähigkeit von CABIN diskutiert. Hierbei wird zuerst auf Teilergebnisse eingegangen (Abschnitt 5.2.1). Darauf werden die in Eingabe- und Vergleichsdaten enthaltenen Unsicherheiten diskutiert (5.2.2) und die Leistungsfähigkeit von CABIN bezüglich der Reproduktion gemessener NPP-Werte besprochen (5.2.3).

In Abschnitt 5.3 wird die Bedeutung einiger Parameter und Konstrukte von CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels besprochen.

Die Diskussion der Möglichkeit einer global einheitlichen Parametrisierung von CABIN erfolgt in Abschnitt 5.4. Dort wird im Hinblick auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von CABIN auf mögliche Verfeinerungen der Detaillierungsebene der Beschreibung der modellierten Prozesse (Abschnitt 5.4.1) und mögliche Erweiterungen von CABIN (5.4.2) eingegangen.

Das Kapitel schließt in Abschnitt 5.5 mit einem Ausblick auf das weitere Vorgehen, hilfreiche Datenerhebungen und weiteren Forschungsbedarf.

5.1 Neuerungen in CABIN

CABIN wurde konzipiert, um die Stickstoffabhängigkeit der NPP in globalen Modellen des gekoppelten C- und N-Kreislaufs, berücksichtigen zu können. Die zentralen Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels sind in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung beschrieben. Dadurch ist es möglich, für die Respiration eine kombinierte angebots- und substratlimitierte Beschreibung zu verwenden.

Im Teilmodell der Photosynthese ist ein dynamischer zweischichtiger stickstoffabhängiger Ansatz umgesetzt, der die Vegetation in je eine lichtgesättigte und eine lichtlimitierte Schicht teilt. Das für diese Arbeit erstellte Allokationsmodell macht es möglich, Situationen zu berücksichtigen, in denen zwar Energie, aber keine Substrate (Kohlenhydrate) für die Allokation zur Verfügung stehen.

Bisherige Arbeiten auf diesem Gebiet haben zumeist eine Beschreibung der Respiration in Abhängigkeit von der Photosynthese oder anhand von Phytomassen und vorgegebenen Wachstumsvorschriften verwendet (Kicklighter et al., 1999). Bei einer solchen Vorgehensweise können sich Inkonsistenzen bei der Allokation ergeben, da nicht feststellbar ist, ob auch genügend Kohlenstoff zur Substanzbildung vorhanden

ist, was dort dementsprechend implizit angenommen wird. Durch die Einführung von internen Kohlenhydratpools wurde dies in CABIN möglich gemacht.

5.2 Leistungsfähigkeit von CABIN

Um die Leistungsfähigkeit von CABIN zu beurteilen, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse der Prüfung von CABIN betrachtet. Es wird zuerst auf die Teilergebnisse eingegangen (Abschnitt 5.2.1). Es folgt eine Betrachtung der Unsicherheiten in Eingabe- und Vergleichsdaten (Abschnitt 5.2.2). Schließlich wird die modellierten NPP und deren Abweichung von den gemessenen Werten, auch im Hinblick auf die Variierung der Parameter diskutiert (Abschnitt 5.2.3). Außerdem werden Ansätze zur Erklärung der auftretenden Abweichungen angesprochen (Abschnitt 5.2.3.3).

5.2.1 Teilergebnisse

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass CABIN weitgehend die gewünschten und bei der Entwicklung zum Ziel gesetzten Eigenschaften zeigt. Im Folgenden wird betrachtet, wie Zwischenergebnisse von CABIN im Vergleich mit Messdaten zu beurteilen sind.

Lebendes Gewebe im Holz. Die Berechnung der Menge lebenden Gewebes zeigt trotz der sehr allgemeinen Annahme, dass das lebende Gewebe eines holzigen Kompartimentes die gleiche Stickstoffkonzentration aufweist, wie das zugehörige krautige Kompartiment, nur eine geringe Abweichung beim Vergleich mit Messdaten (siehe Abschnitt 4.2.3). CABIN liefert hier plausible Ergebnisse.

CO₂-Konzentration im Blatt. Die CO₂-Konzentration im Blatt c_i wird für günstige Bedingungen bei Tag oft bei ca. 70 % der CO₂-Konzentration in der Außenluft gemessen (Wong et al., 1978; Morison, 1987). Der Wert sollte also von CABIN im Bereich von 260 $\mu\text{l l}^{-1}$ berechnet werden.

Für Station 1552 (borealer Nadelwald) umfasst die Spanne der für den 13. August zwischen 8 und 19 Uhr berechneten c_i -Werte (siehe Abschnitt 4.3.1) diesen Referenzwert. Der langfristige Mittelwert unter günstigen Bedingungen (Definition siehe Abschnitt 3.4.3.1) trifft den Referenzwert genau.

Auch für Station 80 (tropischer Regenwald) liegt der Referenzwert in der Spanne der zwischen 5 und 17 Uhr auftretenden c_i Werte. Der langfristige Mittelwert unter günstigen Bedingungen liegt für diese Station etwas über der Referenz. CABIN liefert für c_i in der Grundparametrisierung für den borealen Wald und den tropischen Regenwald ähnlich gute Ergebnisse.

Leitfähigkeit der Stomata für Wasser. Die maximalen Leitfähigkeit der Stomata für Wasser, die GIWACOM im an CABIN gekoppelten Zustand berechnet liegen mit 99 $\text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die tropische Station 80 unter dem von Körner (1994) für tropische Feuchtwälder berichteten Wert von $249 \pm 133 \text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Wert \pm Standardabweichung). Die modellierten maximalen Leitfähigkeiten für die boreale Station 1552 liegen mit $72 \text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ deutlich unterhalb des von Körner (1994) angegebenen Wertes für Nadelwald von $234 \pm 99 \text{mmol m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Im Vergleich mit Spannen von Messwerten der stomatären Leitfähigkeit aus Larcher (1994) liegen die modellierten Werte jeweils im unteren Bereich der für tropische Waldbäume mit 70 bis 300 mmol $m_{leaf}^{-2} s^{-1}$ und für immergrüne Nadelbäume mit 60 bis 200 mmol $m_{leaf}^{-2} s^{-1}$ angegebenen Spannen.

Es zeigt sich, dass CABIN eher dazu neigt, die stomatäre Leitfähigkeit zu unterschätzen.

Photosynthese und Respiration. Die Teilmodelle für die beiden großen Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels, Photosynthese und Respiration, sind im Einzelbetrieb in der Lage, auf Blattebene gemessene Flüsse mit Korrelationskoeffizienten von 0,74 für die Respiration und 0,93 für die Photosynthese zu reproduzieren (Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2). Bei der Respiration handelt es sich hier um die Reproduktion der zur Parametrisierung verwendeten Daten. Die für den Vergleich eingesetzten Photosynthesedaten stellen jedoch nur einen kleinen Teil der zur Parametrisierung des Photosynthesemodells verwendeten Daten dar.

Im gekoppelten Zusammenhang in CABIN wurden Bestandessummen der Photosynthese (A_{ph}) und der Dunkelrespiration der Blätter (R_{ha}) ausgewertet. Es ergeben sich die in Tabelle 5.1 angegebenen Jahresmaxima von A_{ph} , die mit Daten aus Woodward und Smith (1994) verglichen werden. In der selben Tabelle sind auch Tagesmaxima von A_{ph} und R_{ha} -Werte zu Beginn der Nacht gezeigt. Diese werden mit Spannen gemessener Gaswechseldaten (Maxima der Photosynthese und Respiration zu Beginn der Nacht) aus Larcher (1994) verglichen. Für die tropische Station 80 liegt die modellierte Dunkelatmung der oberirdischen krautigen Kompartimente zwischen den von Larcher angegebenen Spannen für Licht- und für Schattenblätter tropischer Waldbäume. Auch für die boreale Station 1552 liegt der modellierte Wert zwischen den angegebenen Spannen für Blätter immergrüner Nadelbäume. Für die Respiration der Blätter liefert CABIN demnach plausible Werte.

Die für A_{ph} modellierten Tageshöchstwerte liegen für beide Stationen unterhalb der Spannen gemessener Werte. Die Jahreshöchstwerte liegen jeweils innerhalb der Spannen, wobei dies bei Station 80 nur bezüglich der von Larcher (1994) angegebenen Werte für Schattenblätter gilt.

Kohlenhydratpools. Zumindest kurzfristige Reservenbildung ist bei allen Pflanzen zu erwarten. Dies ist notwendig, um bei Ressourcenmangel auf Kosten eigener Reserven überleben zu können. Der Jahresverlauf der Füllstände der Kohlenhydratpools zeigt für Station 1552 im borealen Wald durchgängig hohe Füllstände des Reservepools (Abbildung 4.5). Auch der Füllstand des Assimilatpools ist immer deutlich über null. Bei Station 80 im tropischen Regenwald hingegen sind die Kohlenhydratpools fast durchgängig leer (Abbildung 4.6), was nicht den in der Natur beobachteten Verhältnissen (Würth et al., 2005) entspricht. Für den borealen Wald produziert CABIN also plausiblere Füllstände der Kohlenhydratpools, als für den tropischen Regenwald.

5.2.2 Unsicherheiten in Eingabe- und Vergleichsdaten

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse und deren Bewertung sind von den verwendeten Eingabe- und Vergleichsdaten abhängig. Die Eingabedaten wie etwa Wetterdaten und biosphärische Kohlenstoff- und Stickstoffpools sind die treibenden

Tabelle 5.1: Vergleich gemessener Gaswechseldaten mit Teilergebnissen von CABIN für Station 1552 im borealen Wa (siehe Abbildung 4.8 bld und Station 80 im tropischen Regenwald. Photosynthese A_{ph} und Dunkelatmung des oberirdischen krautigen Kompartimentes R_{ha} werden mit Spannen gemessener Werte aus Larcher (1994) (L) und für A_{ph} auch aus Woodward und Smith (1994) (W) verglichen. Die Vergleichsdaten aus Larcher (1994) sind meist zwischen an Licht und an Schatten angepassten Blättern differenziert. Die Datumsangaben beziehen sich auf den Tag des vierten Modelljahres (Modell im steady state) und die Zeitangaben in Klammern auf die Modellstunde, für die die Werte berechnet wurden (siehe Abschnitt 3.4.3.1). Angegeben sind Tageshöchstwerte der zweiten Nachtstunde ohne Strahlung (t) und Jahreshöchstwerte (j) von A_{ph} sowie R_{ha} -Werten. Alle Werte in $\mu\text{molC m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$.

	Ergebnisse von CABIN			Literaturangaben		
	Station	Zeitpunkt	Wert	L	W	
R_{ha}	80	02.07. 21h	t 0,25	Licht Schatten	0,3 – 0,5 0,05 – 0,2	— —
		1552	13.08. 23h	t 0,27	Licht Schatten	0,5 – 0,7 um 0,09
A_{ph}	80	02.07. 14h	t 4,9 j 6,5	Licht Schatten	10 – 16 5 – 7	5,6 – 8,3
		1552	13.08. 12h	t 2,0 j 5,8	nicht dif- ferenziert	3 – 6

Kräfte von CABIN. Sie werden in die parametrisierten Modellgleichungen eingesetzt und bestimmen die resultierende modellierte NPP.

Die die modellierte NPP wird anhand von Vergleichen mit Messdaten bewertet. Sowohl Eingabe- als auch Messdaten sind mit Unsicherheiten behaftet, auf die in den Abschnitten 5.2.2.1 und 5.2.2.2 kurz eingegangen wird.

5.2.2.1 Eingabedaten

Neben den in CABIN enthaltenen Prozessen und Regulationsvorgängen selber sind auch die zum Betreiben von CABIN verwendeten Daten für die modellierte NPP verantwortlich. Hier bestehen Unsicherheiten, die zur Streuung in den Ergebnissen beitragen können:

Wetterdaten. Bezüglich der Wetterdaten sind zwei Punkte von Bedeutung. Zum einen sind die einzelnen verwendeten Größen (Niederschlag, Temperatur, Strahlung) untereinander nicht konsistent. Sie wurden für manche Stationen aus Mangel an Daten aus verschiedenen Datensätzen hergeleitet, in jedem Fall aber anhand von abgeleiteten Daten auf Stundenwerte interpoliert (siehe Abschnitt 3.3.4). Dies kann dazu führen, dass insbesondere die direkt die Photosynthese beeinflussenden Größen Temperatur und Strahlung in ihren auftretenden Kombinationen unrealistisch sind.

Zum anderen wurde versucht, für die NPP-Stationen durchschnittliche und repräsentative Wetterdaten zu erzeugen. Dazu wurden entweder langfristige Mittel-

werte verwendet, oder es wurden aus möglichst vielen Jahren Daten stochastisch zur Verwendung ausgewählt (siehe Abschnitt 3.3.4). In jedem Fall entsprechen die zum Antrieb von CABIN eingesetzten Wetterdaten nicht dem im Jahr der NPP-Messung am Messort herrschenden Wetter. Selbst bei idealer Formulierung aller Teilmodelle kann daher nicht erwartet werden, dass CABIN in dieser Arbeit die in einem speziellen Jahr gemessene NPP exakt reproduziert.

Zudem wurden insbesondere bei den Höhenangaben teilweise Widersprüche zwischen verschiedenen Datenquellen (siehe Abschnitt 3.2) gefunden. Es wurden durchgängig die in der ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2) angegebenen Höhenangaben verwendet, wobei es jedoch für manche Stationen möglich erscheint, dass bei der Erstellung der Datenbank Einheiten aus dem amerikanischen und dem metrischen System vertauscht wurden. Da die Höhenangaben Einfluss auf die Berechnung der Strahlungsdaten haben (Abschnitte 3.3.4.1 und C.1) kann die modellierte NPP dadurch beeinflusst werden.

Phytomassen und Stickstoffgehalte. Da die in CABIN eingesetzten Phytomassen von HRBM berechnet wurden (Abschnitt 3.3.1) und als Mittel über große Flächen anzusehen sind, die NPP-Messungen aber auf kleinen Flächen vorgenommen wurden, sind hier Abweichungen zu erwarten.

In der Natur ergibt sich ein Gleichgewicht zwischen der NPP und den existierenden Phytomassen. Eine geringere NPP bedeutet geringere Strukturausbildung die wiederum bei gleich bleibender Bildung von Bestandesaufbau zu einer Verringerung der Phytomasse führt. Auf diese Weise ist die an einem Ort existierende Phytomasse von der NPP abhängig, was in CABIN durch die als Eingabedaten eingesetzten und nicht dynamisch berechneten Massen nicht berücksichtigt wurde.

Ähnlich wie mit den reinen Kohlenstoffphytomassen verhält es sich mit den Stickstoffgehalten (Abschnitt 3.3.1). Die Verfügbarkeit von Stickstoff kann kleinräumig stark variieren, und so die Eigenschaften der Vegetation beeinflussen (Hutchings et al., 2003). Auch die aus NCIM entnommenen mittleren C:N-Verhältnisse können so deutlich von den an der NPP-Station herrschenden Bedingungen abweichen.

Phytomassenverhältnisse. Zur Berechnung der Kohlenstoffbilanz ist ein realistisches Verhältnis von Photosynthese betreibender zu Kohlenhydrat verbrauchender Phytomasse von Bedeutung. Um zu prüfen, ob diese Phytomassenverhältnisse in den Eingabedaten (siehe Abschnitt 3.3.1) realistisch sind, wurden sie mit Daten aus der Originalliteratur zu den NPP-Messorten (siehe Tabelle 5.2) und einer Datensammlung über Wälder (Cannel und Jackson, 1985) verglichen. Der Vergleich ergibt, dass das HRBM für die borealen Wälder die Blattphytomasse unterschätzt, während es sie für den Trockenwald und den tropischen Regenwald eher überschätzt (Tabelle 5.2). Im temperierten Wald treten beide Fälle auf. Diese Abweichungen von den Messwerten haben Einfluss auf die modellierte NPP und somit auch auf deren Abweichung von der gemessenen NPP.

5.2.2.2 Vergleichsdaten

Die Güte eines Modelllaufes wird in dieser Arbeit anhand von Vergleichen mit gemessenen NPP-Werten bewertet. Für eine Beurteilung der gefundenen Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP ist auch die Ungenauigkeit dieser Vergleichsdaten zu beachten.

Tabelle 5.2: Von HRBM berechnete Verhältnisse von Photosynthese betreibender zu rein respirierender Phytomasse im Vergleich mit Daten aus der Literatur (Quellen siehe letzte Spalte). Angegeben sind prozentuale Anteile. Vegetationstypen: Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald.

Station	Vegetation	Anteil grüner Phytomasse (%)	
		HRBM (Gitterelement)	Literatur (Quelle)
1552	Bo	3,8 (21738)	8,7 (Mälkönen, 1975)
1556	Bo	3,8 (21754)	6,8 (Paavilainen, 1980)
1567	Bo	3,8 (11554)	6,8 (Cannel und Jackson, 1985)
1009	Te	2,2 (15158)	2,9 (Cannel und Jackson, 1985)
991	Te	2,2 (15150)	2,9 (Cannel und Jackson, 1985)
709	Te	2,3 (14507)	2,4 (Cannel und Jackson, 1985)
1377	Te	2,2 (22288)	1,4 (Cannel und Jackson, 1985)
1184	Te	2,0 (22488)	1,6 (DeAngelis et al., 1981)
773	Te	2,2 (41103)	1,7 (Tadaki et al., 1969)
23	DF	3,3 (27388)	1,5 (DeAngelis et al., 1981)
80	Tr	2,3 (57932)	2,2 (Kira und Shidei, 1967)
65	Tr	2,3 (41427)	1,4 (Kira, 1977)

Da die einzelnen Vergleichsdaten in einem einzigen oder innerhalb einiger weniger Jahre aufgenommen wurden, repräsentieren sie keine mittlere NPP für den jeweiligen Standort. Selbst für den Messzeitpunkt machen sie nur eine Aussage über die begrenzte Fläche, auf der die Messungen stattfanden. Hier ist noch nicht berücksichtigt, dass auch die Messung der NPP an den jeweiligen Stationen methodischen und stochastischen Unsicherheiten unterliegt (siehe hierzu Clark et al., 2001a).

Wie unterschiedlich die NPP kleinräumig sein kann, zeigen die vier Paare von Doppelstationen (Stationspaare: boreal 1552/1556, temperiert 1377/1379, Savanne 105/106, tropischer Regenwald 65/66, siehe Tabelle 3.2). Die beiden Stationen aller Paare liegen in Entfernungen voneinander, die geringer als die Ausmaße eines Gitterelementes von CABIN sind. Die gemessene NPP unterscheidet sich innerhalb der Paare um bis zu einem Faktor von 1,8 (Stationspaar 105/106). Dieser Unterschied macht deutlich, wie hoch die kleinräumige Heterogenität der NPP in der Natur sein kann. CABIN kann solche Unterschiede nicht erfassen, da sie sich unter seinem räumlichen Auflösungsvermögen abspielen. Analysiert man die ORNL-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2) im Hinblick auf Doppelstationen, so finden sich sogar NPP-Unterschiede bis zu einem Faktor von 4.

5.2.2.3 Fazit aus den Überlegungen zur Unsicherheit der Eingabe- und Vergleichsdaten

Die Unsicherheiten in Zustandsdaten und treibenden Kräften und in den Vergleichsdaten müssen bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von CABIN und bei den Überlegungen zur Bedeutung der Parameter für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels berücksichtigt werden. Eine gefundene Abwei-

chung zwischen modellierten Werten und Messwerten aus der Literatur kann nicht einfach auf ein fehlerhaftes oder ungenaues Modell zurückgeführt werden. Die Ursache einer solchen Abweichung kann ebensogut durch ungenaue Eingabedaten oder Fehler in den Vergleichsdaten verursacht werden. Eine Kombination aller Ursachen ist zu erwarten, wobei eine Differenzierung nur schwer möglich ist.

5.2.3 Abweichungen zwischen Modell und Messung

In diesem Abschnitt wird zunächst die Leistungsfähigkeit von CABIN bei Grundparametrisierung diskutiert und versucht, Ursachen für die Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP zu finden (Abschnitte 5.2.3.1 und 5.2.3.2). Anschließend wird besprochen, wie die Leistungsfähigkeit von CABIN vor dem Hintergrund der durchgeführten Parametervariierungen zu beurteilen ist (Abschnitt 5.2.3.3).

5.2.3.1 Abweichungen bei Grundparametrisierung

Die mit CABIN modellierte NPP weicht für die verschiedenen Vegetationstypen unterschiedlich stark von den gemessenen Werten ab (für den Modelllauf bei Grundparametrisierung siehe Abschnitt 4.3.2). In den Abweichungen findet sich ein Muster: Tendenziell wird die Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP positiver, je geringer die mittlere Jahrestemperatur ist (siehe Abbildung 4.8 b). Die geringsten Abweichungen treten zwischen 13°C und 22°C mittlerer Jahrestemperatur auf.

Um die Resultate beurteilen zu können, werden die Messwerte mit den Ergebnissen eines intensiv getesteten Modells verglichen. Hierzu wird das globale Kohlenstoffkreislaufmodell HRBM (Esser et al., 1994) herangezogen, mit dem auch die Phytomassen für diese Arbeit bestimmt wurden (Abschnitt 3.3.1).

Die Gegenüberstellung der gemessenen NPP mit der mit HRBM modellierten ergibt eine geringere Streuung, als der Vergleich mit der mit CABIN bei mittlerer Parametrisierung modellierten NPP (Abbildung 5.1). Der Korrelationskoeffizient des Vergleiches der gemessenen NPP mit der mit HRBM modellierten beträgt 0,57. Der selbe Vergleich mit mit CABIN modellierter NPP ergibt einen Korrelationskoeffizienten von 0,07. Vor allem treten bei HRBM keine Nullwerte der modellierten NPP in den Tropen und bei der mediterranen Vegetation auf. Lässt man die Nullwerte außer acht, ergibt der Vergleich der mit CABIN modellierten NPP mit den Messwerten einen Korrelationskoeffizienten von 0,50.

Die maximale Abweichung von den gemessenen Werten liegt bei beiden Modellen um den Faktor 6. Stationen mit einer modellierten NPP von null wurden hier nicht berücksichtigt, ebenso wie die Wüstenstation 737, bei der durch die Modell-NPP von fast null ein Faktor von 60 auftritt.

5.2.3.2 Analyse der Abweichungen

Starke Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP zeigen an, dass ein Ungleichgewicht zwischen der modellierten Photosynthese und Respiration aufgetreten ist, was bei CABIN in besonders warmen und kalten Klimaten vorkommt (Abbildung 4.8 b).

In verschiedenem Maße beeinflussen sämtliche Aspekte der dynamisch interagierenden Teilmodelle von CABIN das Gleichgewicht der beiden großen Prozesse des

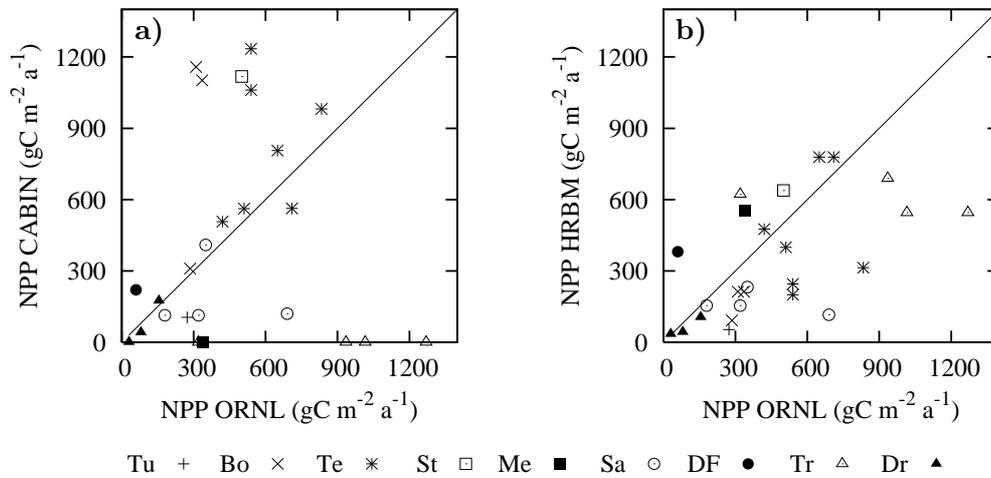


Abbildung 5.1: Vergleich von gemessener NPP (ORNL) mit (a) mit CABIN modellierter NPP (gleiche Daten wie Abbildung 4.7) bzw. (b) mit HRBM modellierter NPP. Die durchgezogene Linie ist die eins-zu-eins-Linie. Der Flächenbezug ist die Grundfläche. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald, Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

Kohlenstoffgaswechsels. Dieses Gleichgewicht wird unter anderem durch das Verhältnis von Photosynthese betreibender zu rein respirierender Phytomasse bestimmt. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten zeigen Tendenzen, den Anteil photosynthetisierender Phytomasse in warmen Klimaten zu über- und ihn in kalten zu unterschätzen (Abschnitt 5.2.2.1). Dies wirkt bereits den auftretenden Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP entgegen, da es die Photosynthese des Bestandes in kalten Klimaten, wo die NPP durch CABIN überschätzt wird, verringert, und in warmen Klimaten, wo die NPP unterschätzt wird, erhöht.

Als besonders einflussreich auf die modellierte NPP haben sich in dieser Arbeit der Grundumsatz, die Stickstoffabhängigkeit von Photosynthese und Respiration sowie die Referenztemperatur erwiesen. Von diesen war es jedoch nur durch Variierung des Grundumsatzes und der Stickstoffabhängigkeit der Respiration möglich, mit CABIN für alle Stationen eine modellierte NPP größer null zu erzeugen.

Keiner der beiden großen Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels kann auf Basis der Ergebnisse deutlich als hauptsächliche Ursache für die Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP identifiziert werden. Es ist nicht auszumachen, ob die Respiration mit sinkender mittlerer Jahrestemperatur zu stark sinkt, oder ob die Photosynthese stärker sinken sollte. Beides hätte den gleichen verringernenden Effekt auf die Abweichungen.

Im Hinblick auf die oben angesprochene Möglichkeit, durch Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration oder des respiratorischen Grundumsatzes für alle Stationen eine modellierte NPP größer null zu erzeugen, scheint die Respiration zumindest für die Unterschätzung der NPP in den warmen Klimaten verantwortlich zu sein.

CABIN liefert mit sinkender mittlerer Jahrestemperatur stärker gefüllte Kohlenhydratpools (Tabelle 4.6). Bei Freilandmessungen an jeweils mehreren Arten fanden sich im Vergleich zwischen Messorten mit verschiedenen durchschnittlichen Tempe-

raturen ebenfalls unter kälteren Bedingungen höhere Kohlenhydratkonzentrationen (Würth et al., 1998; Hoch und Körner, 2003). Unterschiede zwischen verschiedenen tropischen Standorten wurden in der Literatur auf die verschiedenen Nachttemperaturen zurückgeführt, wobei an dem Ort mit den geringeren Temperaturen höhere Konzentrationen gefunden wurden (Würth et al., 1998). Auch dies lässt auf die Respiration als hauptsächlich verantwortlichen Prozess schließen.

Den genannten Hinweisen auf die Respiration als hauptsächlich die Abweichungen verursachender Prozess steht jedoch entgegen, dass bei der Prüfung der Teilergebnisse die Respiration plausible Werte lieferte, während die Photosynthese sowohl im tropischen Regenwald als auch im borealen Wald unterschätzt wurde (Abschnitt 5.2.1).

Die Stationen in warmen Klimaten mit durch CABIN stark unterschätzter NPP stehen denjenigen in kalten Klimaten mit deutlich überschätzter NPP gegenüber. Für letztere kann durch Veränderung der Referenztemperatur, des Q_{10} -Wertes der Respiration und der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese die Überschätzung verringert werden. Durch Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration ist dies nur in geringem Maße möglich. Da von den genannten Variierungskategorien die höchste RVB bei der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese auftritt (siehe Tabelle 4.16), scheint in kalten Klimaten eher die modellierte Photosynthese hauptsächlich für die Abweichungen verantwortlich zu sein.

5.2.3.3 Beurteilung der Leistungsfähigkeit

Durch die Variierung der Parameter von CABIN in plausiblen Wertebereichen liegt für jede Station eine Spanne modellierter NPP-Werte vor. Anhand dieser Spannen ist zu beurteilen, ob CABIN plausible Ergebnisse liefert.

Erkennen plausibler Ergebnisse. CABIN wurde entwickelt, um global für Gitterelemente mit Flächen von $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ geographischer Länge mal Breite die durchschnittliche NPP zu berechnen. Messdaten über die durchschnittliche NPP solch großer Flächen liegen nicht vor, so dass zum Vergleich Punktdaten herangezogen werden mussten.

Die NPP auf einer solchen Fläche ist nicht homogen. Ein Messwert der NPP für einen beliebigen Ort auf der Fläche eines Gitterelementes liegt innerhalb der (unbekannten) Spanne der auf dieser Fläche in der Natur vorkommenden NPP-Werte (siehe Abbildung 5.2 a). Die Lage des Messwertes innerhalb der Spanne ist grundsätzlich unbekannt, da auch die Größe der Spanne unbekannt ist. Dass diese Spanne recht groß sein kann, zeigt sich an den großen Unterschieden, die bei mehreren NPP-Messungen auf dem gleichen Gitterelement auftreten können (siehe Abschnitt 5.2.2.2).

Eine plausible modellierte NPP muss zumindest innerhalb dieser Spanne liegen. Dies kann nur dann sichergestellt werden, wenn es möglich ist, mit CABIN sowohl modellierte NPP-Werte zu berechnen, die über als auch unter der gemessenen NPP liegen, was sich daran erkennen lässt, dass im Rahmen der Variierung beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP auftreten (Abbildung 5.2 b). Genauere Kriterien lassen sich nicht formulieren, da es nicht möglich ist, herauszufinden, wo der gemessene NPP-Wert innerhalb der Spanne der in der Natur auf dem Gitterelement vorkommenden NPP liegt.

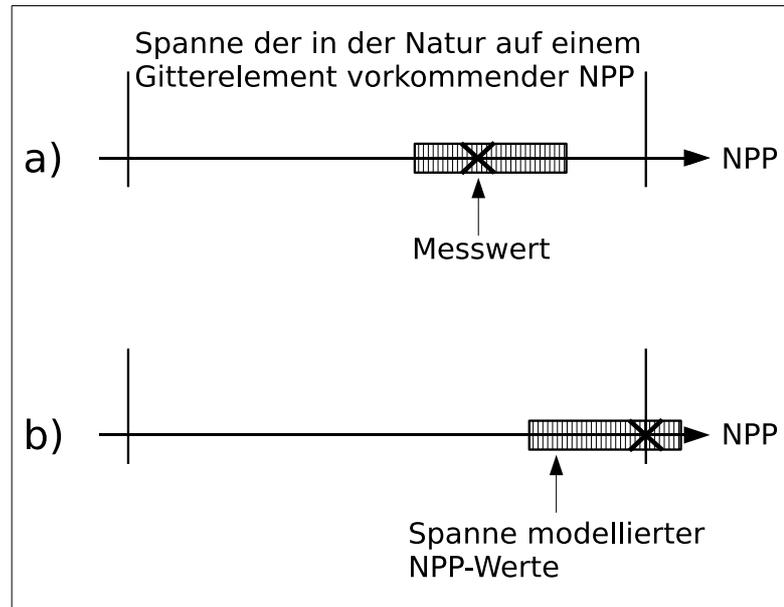


Abbildung 5.2: In der Natur tritt auf einer Fläche eine Spanne verschiedener NPP-Werte auf. Mit einem Messwert der NPP steht ein Punkt an unbekannter Position innerhalb dieser Spanne zum Vergleich mit einer modellierten NPP zur Verfügung. Nur wenn mit CABIN gegenüber dem Messwert sowohl größere als auch kleinere modellierte NPP-Werte erzeugt werden können, ist sichergestellt, dass von CABIN für die betreffende Fläche plausible Ergebnisse produziert werden. Teil a) der Abbildung zeigt eine solche Situation. Einen Extremfall zeigt Teil b) der Abbildung. Hier liegt der Messwert auf einer Grenze der natürlichen Spanne.

Sind die Ergebnisse plausibel? Abgesehen von der mediterranen Vegetation, den Savannenstationen 105 und 271 und den Wüstenstationen 634 und 737 ergeben sich im Rahmen der durchgeführten Variierungen der Parameter von CABIN für alle untersuchten Stationen beide Vorzeichen der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP. Für einen Großteil der Stationen erzeugt CABIN demnach plausible Ergebnisse.

Alle Stationen, bei denen nur ein Vorzeichen auftritt, zeigen negative Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP. Für die mediterrane Station und die Wüstenstation 634 sind die kleinsten im Rahmen der Variierungen auftretenden Abweichungen mit $-13,6\%$ und $-9,5\%$ gering. Deutliche Abweichungen mit $-49,0\%$ und $-72,3\%$ zeigen sich bei den Savannenstationen 105 und 271. Die Wüstenstation 737 liegt bei ihrer geringsten Abweichung von $-90,3\%$ schon fast bei einer modellierten NPP von null. Für diese Stationen kann nicht sichergestellt werden, dass die modellierte NPP innerhalb der Spanne natürlich auftretender NPP-Werte liegt.

5.3 Bedeutung der Parameter für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen

In diesem Abschnitt werden zunächst Überlegungen zum Zusammenhang zwischen den Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP und den variierten Parametern vorgestellt. Dies wird mit der Bedeutung der Parameter für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen in Beziehung gesetzt, wobei insbesondere die relati-

ve Variationsbreite (RVB, siehe Abschnitt 3.4.4.2), berechnet über die Gesamtheit aller Stationen, berücksichtigt wird. In Tabelle 4.16 sind die variierten Parameter bezüglich der RVB über die Gesamtheit aller Stationen in eine Rangfolge gebracht.

Die untersuchten Variierungskategorien (Abschnitt 3.4.4) werden im Folgenden bezüglich ihrer Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen besprochen:

5.3.1 Speicherung

Viele Messungen der Kohlenhydratpools bei verschiedensten Vegetationstypen ergaben hohe Konzentrationen (Körner und Miglietta, 1994; Hoch et al., 2003; Hoch und Körner, 2003; Körner, 2003; Körner et al., 2005; Würth et al., 2005; Shi et al., 2006). Poolgrößen bei oder nahe an null, wie sie bei den tropischen Stationen von CABIN berechnet werden, sind daher unrealistisch.

Bei Messreihen in montanen Gebieten zeigte sich, dass mit zunehmender Nähe zur Baumgrenze und damit abnehmenden Temperaturen die Kohlenstoffpools eher größer wurden (Hoch und Körner, 2003). Auch im Vergleich verschiedener Vegetationstypen und Standorte fanden sich höhere Kohlenhydratkonzentrationen an den kälteren Orten (Würth et al., 1998, und Zitate darin). Diese Tendenz zu größeren Speicherpools bei geringeren Temperaturen konnte in dieser Arbeit nachvollzogen werden: Positive Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP treten bei tieferen mittleren Jahrestemperaturen (Abbildung 4.8) und hohen Füllständen der Kohlenhydratpools (Abbildung 4.10) auf. Hohe Kohlenhydratmengen in den Tropen konnten aber im Gegensatz zur oben angegebenen Literatur in CABIN nicht erreicht werden (Tabelle 4.6).

In CABIN geht eine gegenüber dem Messwert erhöhte Modell-NPP mit deutlich gefüllten ResC-Pools einher (siehe Abb. 4.10). Für Wälder wurden bei verringerten Speicherkapazitäten höhere NPP-Werte berechnet (Abschnitt 4.4.1.1). Dies ist auf die dadurch erhöhten Füllstände des Assimilatpools zurückzuführen. Aufgrund der gefundenen Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP ließe sich folgern, dass tropische Bäume eher geringe und boreale eher hohe Speicherkapazitäten haben sollten. Da aus der Literatur keine expliziten Aussagen zu Kapazitäten solcher Pools im Freiland vorliegen, können die Modellwerte nicht direkt mit Messwerten verglichen werden. Die Kapazitätsunterschiede zwischen verschiedenen Vegetationstypen könnten jedoch für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen von Bedeutung sein.

Im Rahmen der in dieser Arbeit als plausible Spanne für die Kapazitäten eingesetzten Werte ist dies jedoch nicht der Fall: Die RVB über die Gesamtheit aller Stationen liegt im Vergleich mit den anderen acht variierten Parameterkategorien auf dem sechsten Rang (siehe Tabelle 4.16). Sie ist nur etwa ein Viertel so groß, wie die RVB auf dem fünften Rang (Verringerung der Menge lebenden Gewebes im Holz). Die Speicherparameter haben demnach eine eher geringe Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels.

Im Vergleich zu Messdaten fehlen in den Ergebnissen von CABIN in den Tropen Kohlenhydrate, während sie in den kälteren Zonen im Überschuss vorhanden sind. Auch eine zusätzliche zeitliche Steuerung der Kohlenstoffflüsse in Bezug auf Allokation oder Speicherung kann hier kaum Abhilfe schaffen, da nur wo schon eine hohe NPP simuliert wird, überhaupt Kohlenhydrate zum Allokieren vorhanden wären. Dennoch könnte eine zusätzliche Regulierung von Allokation und Speicherung zu einem realistischeren Verhalten von CABIN beitragen.

5.3.2 Stickstoffabhängigkeit der Respiration

Zur Untersuchung der Bedeutung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels wurden für die drei diesen Zusammenhang bestimmenden Parameter jeweils gegenüber der Grundparametrisierung geringere und höhere Werte eingesetzt. Es zeigte sich, dass die Hälfte dieser Parametersätze nicht zu stabilen Modellläufen führen (siehe Abschnitt 4.4.1.3). Das Ungleichgewicht von Photosynthese und Respiration führt dort zu einem unrealistischen Modellverhalten mit überhöhten Kohlenhydratpools. Dies ist der Fall, wenn die Respiration besonders gering ist und zu wenig der durch die Photosynthese erzeugten Kohlenhydrate verbraucht^a.

Von den Modellläufen mit dem geringen Wert für $M_{rN,Ref}$, den Maximalwert des Respirationskoeffizienten, ist nur ein einziger Lauf stabil, während von den Läufen mit mittlerem $M_{rN,Ref}$ sechs und mit hohem sieben stabil sind (siehe Tabelle 4.9). Durch die geringe Respiration ergibt sich implizit auch eine geringe Allokation. Im Falle der instabilen Läufe ist sie durchgängig null.

Es zeigt sich hier, dass die Stickstoffabhängigkeiten von Photosynthese und Respiration in einem geeigneten Verhältnis zueinander stehen müssen. Ein starkes Ungleichgewicht der Prozesse, insbesondere unzureichender Verbrauch der sich ansammelnden Assimilate, führt zu in der Realität unmöglichen überhöhten Kohlenhydratpools und einer Modell-NPP von null. Eine solche Situation kommt in der Natur nicht vor.

Die RVB über die Gesamtheit aller Stationen liegt auf dem vierten Rang der neun untersuchten Parameter. Der Stickstoffabhängigkeit der Respiration ist demnach eine hohe Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels zuzuschreiben.

5.3.3 Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese

Die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese wurde variiert, indem verschiedene Parametersätze, die jeweils für verschiedene funktionelle Gruppen von Pflanzen aufgestellt wurden, verwendet wurden (siehe Abschnitt 3.4.4.5). Im Gegensatz zur Varyierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration kam es hier nicht zu instabilen Modellläufen. Dies sollte seine Ursache darin haben, dass das Respirationsmodell in seiner Grundparametrisierung ausreichend Kohlenhydrate verbraucht, was sich daran erkennen lässt, dass die Füllstände der Kohlenhydratpools nicht höher ausfallen, als bei den Modellläufen der übrigen Variierungskategorien (Daten nicht gezeigt).

Die RVB über die Gesamtheit aller Stationen liegt auf Rang zwei der neun variierten Parameter. Die Bedeutung der Parametrisierung der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels ist demnach hoch. Der hohe Einfluss auf die modellierte NPP zeigt sich auch darin, dass es nur bei der Varyierung der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese bei den Stationen im borealen Wald zu modellierten NPP-Werten von null kommt.

^aHier ist zu berücksichtigen, dass die Funktion zur Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern bei diesen Modellläufen nicht aktiviert war.

5.3.4 Temperaturabhängigkeit der Respiration

Die Reaktion der modellierten NPP auf eine Veränderung der Temperaturabhängigkeit der Respiration hängt von der Referenztemperatur und Temperaturdaten, mit denen CABIN angetrieben wird, ab. Liegen letztere (während der Vegetationsperiode) häufig unterhalb der Referenztemperatur, so bewirkt eine erhöhte Temperaturabhängigkeit (höherer Q_{10} -Wert) eine Verringerung der Respiration. Liegen sie vermehrt darüber, ergibt sich eine Erhöhung.

Da in beiden Situationen eine Rückkoppelung über die Kohlenhydratpools stattfindet, ist der Zusammenhang bei Betrachtung der über ein Jahr aggregierten Werte nicht überall gleich stark ausgeprägt und kann sogar umgekehrt werden (so bei der Steppenstationen und der Wüstenstation 885, siehe Tabellen in Anhang F).

Der Wert des Q_{10} der Respiration beträgt in der Grundparametrisierung von CABIN 1,99 (Abschnitt 4.1.2.4). Im Rahmen der Variierung der Temperaturabhängigkeit der Respiration wurde Q_{10} je einmal auf 1,5 und 2,5 gesetzt. Diese Veränderung reichte nicht aus, um die unterschätzte modellierte NPP im borealen Bereich deutlich zu verringern oder die überschätzte modellierte NPP in den Tropen zu erhöhen.

Um mittels der Temperaturabhängigkeit der Respiration die NPP deutlich zu beeinflussen, müssten Q_{10} -Werte postuliert werden, die außerhalb der in der Literatur angegebenen Spannen (Ivanova et al., 1989; Tjoelker et al., 2001; Atkin et al., 2005) liegen, insbesondere bei geringen Q_{10} -Werten.

Unterschiede in der kurzfristigen Temperaturabhängigkeit der Respiration haben demnach in CABIN keine große Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels. Dies zeigt sich auch in der RVB, die hier den vorletzten Rang unter den variierten Parametern einnimmt (siehe Tabelle 4.16).

5.3.5 Temperaturabhängigkeit der Photosynthese

Zur Untersuchung des Einflusses der Temperaturabhängigkeit der Photosynthese wurde die Optimumstemperatur um $\pm 30\%$ variiert. Durch diese Variation verschiebt sich das Maximum der Photosynthese-Temperatur-Kurve (siehe Abschnitt 2.3.2), wodurch sich durch den veränderten Kurvenverlauf die Photosynthese bei jeder Temperatur verändert. Hiervon sind die maximale Elektronentransportrate und die maximale Carboxylierungsleistung der Rubisco betroffen. Die kinetischen Parameter der Rubisco blieben in ihrer Temperaturabhängigkeit unverändert.

Die geringen Auswirkungen der Variierung der Optimumstemperatur im borealen Bereich (Abschnitt 4.4.1.6) haben ihre Ursache in der kleinen absoluten Änderung der Optimumstemperatur bei niedrigen Werten. Um die gemessene NPP zu erreichen, müsste in der borealen Zone eine wesentlich geringere Optimumstemperatur postuliert werden. Dies erscheint unrealistisch und widerspricht der Aussage, dass die Optimumstemperatur grundsätzlich über der Durchschnittstemperatur am Standort liegt (Chapin und Oechel, 1983).

Für die Stationen im tropischen Regenwald konnte durch die 30-prozentige Erhöhung der Optimumstemperatur keine positive Modell-NPP bewirkt werden. Auch hier erscheinen noch höhere Werte unrealistisch. Sie liegen außerhalb des als plausibel hergeleiteten Wertebereichs.

Die Optimumstemperatur der Photosynthese hat für CABIN offensichtlich keine entscheidende Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen

Gaswechsels. Dies zeigt auch die RVB: Sie rangiert auf dem siebten Rang der neun variierten Parameter (siehe Tabelle 4.16).

5.3.6 Referenztemperatur

Durch die Variierung der Referenztemperatur verändern sich sowohl die modellierte Photosynthese als auch die Respiration. Es ergeben sich deutliche Änderungen der modellierten NPP, wobei eine Erhöhung der Referenztemperatur (mit Ausnahme einiger Stationen mit einer Modell-NPP von null) eine Erhöhung der modellierten NPP verursacht (siehe Tabellen in Anhang F). Es konnte so eine positive NPP bei zweien der tropischen Regenwaldstationen erzielt werden.

Die Referenztemperatur hat eine große Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels. Für sie wurde über die Gesamtheit aller Stationen der dritthöchste RVB-Wert ermittelt (Tabelle 4.16).

Es gibt keine einheitliche Regel, wie eine Referenztemperatur festzulegen ist: Es ist nicht geklärt, ob mittlere, Maximum- oder Minimumtemperatur als Referenz anzusehen sind und über welchen Zeitraum diese als gültig anzunehmen sind. Die in dieser Arbeit verwendeten Werte stammen aus GIWACOM und sind den einzelnen Vegetationstypen zugeordnet (Abschnitt 3.3.2). Es ist zu berücksichtigen, dass die Vegetationstypen, denen die Referenztemperaturen zugeordnet sind, diejenigen aus der Vegetationskarte nach Schmithüsen (1976) sind. Die Zusammenfassung von Stationen verschiedener Schmithüsen-Vegetationstypen zu allgemeineren Vegetationstypen (siehe Abschnitt 3.2) wurde nur zu Auswertungszwecken vorgenommen.

Eine Schwierigkeit besteht hier darin, dass für einen Schmithüsen-Vegetationstyp unabhängig vom geographischen Ort durchgängig die gleiche Referenztemperatur angenommen wird, wohingegen sich die Temperatursituation an den verschiedenen Standorten unterscheidet (siehe Anhang H). Es handelt sich dabei um ein methodisches Problem: Für alle Vegetationstypen sollen die selben einheitlich parametrisierten Funktionen zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeiten verwendet werden. Diese Funktionen modulieren die Aktivität von Prozessen über die Abweichung der herrschenden von der Referenztemperatur. Da gleiche Temperaturabweichungen überall einen gleich starken Einfluss auf die Prozesse haben, muss das Verhältnis der gesetzten Referenztemperaturen zum Temperaturklima an den jeweiligen Orten stimmen. Hier wäre eine geographische Lösung interessant, bei der die Referenztemperatur nicht vom Vegetationstyp sondern von den Temperaturbedingungen am jeweiligen Ort abhängig gemacht wird.

5.3.7 Lebendes Gewebe im Holz

Die Menge lebenden Gewebes ist neben der Stickstoffkonzentration die einzige Größe in CABIN, die die Zusammensetzung des Holzes beschreibt. Der lebende Anteil hat bei Holzpflanzen einen wesentlichen Einfluss auf das Verhältnis von Photosynthese betreibender zu rein respirierender Phytomasse. Ein zu hoher Anteil lebender Phytomasse kann hier durch den Einfluss der Respiration auf die C-Bilanz zur Verknappung der Kohlenhydrate führen.

Die Daten zu den Phytomassen der einzelnen Kompartimente stammen von HRBM (Abschnitt 3.3.1) und sind daher mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Aus Tabelle 5.2 lässt sich entnehmen, dass das HRBM in den kühleren Klimaten die Blattphytomasse eher zu gering berechnet, während es für die Vegetationsty-

pen der wärmeren Zonen eher zu hohe Blattphytomassen voraussagt. Dies bedeutet, dass das HRBM bereits Phytomassen liefert, die den in dieser Arbeit gefundenen Abweichungen von den Messwerten entgegen wirken.

Die Verringerung der lebenden Holzanteile um bis zu 40 % führt bei allen holzigen Vegetationstypen zu einem Anstieg der NPP. Ausnahmen bilden zwei Stationen im tropischen Regenwald, wo die modellierte NPP null bleibt (Tabelle 4.13).

Für die übrigen Waldvegetationstypen wäre ein erhöhter Anteil lebenden Gewebes zu postulieren, da sie eine gegenüber den Messwerten erhöhte modellierte NPP aufweisen. Dies passt auch zu den dort auftretenden hohen bis überhöhten Füllständen der Kohlenhydratpools, da für höhere Speichermengen auch mehr lebendes Gewebe vorhanden sein sollte.

Die angesprochenen Postulate sind momentan nicht an Messwerten überprüfbar, da nicht ausreichend Daten publiziert sind. Verringerte Anteile lebenden Gewebes in den Tropen erscheinen jedoch möglich, solange gewährleistet bleibt, dass die Speicher- und Transportfunktionen im Holz erhalten bleiben.

Die generelle Annahme, dass sich die Menge lebenden Gewebes aus dem Stickstoffpool im Holz herleiten lässt, scheint in ihrer reinen Form unter den Konstruktionsbedingungen von CABIN zumindest fraglich. Eine vegetations- oder klimaspezifische Korrektur des Verhältnisses sollte versucht werden.

Der Menge lebenden Gewebes ist eine mittlere Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels zuzuschreiben. Die RVB liegt an Platz fünf der Rangliste der variierten Parameter (siehe Tabelle 4.16).

5.3.8 Grundumsatz

Grundlage der Berechnung der Allokation und damit der NPP ist in CABIN die Abschätzung des respiratorischen Grundumsatzes, den ein Gewebe benötigt, um seine Funktionalität aufrecht zu erhalten. Die Stickstoffkonzentration des jeweiligen Gewebes wird als Proxidatum verwendet, um den Grundumsatz abzuschätzen (siehe Abschnitte 3.1.8 und 4.1.4).

Der in CABIN verwendete von Ryan (1991a) aufgestellte Zusammenhang zwischen Grundumsatz und Stickstoffkonzentration (Gleichung 3.1) bezieht sich auf das Konzept der trennbaren Wachstums- und Erhaltungsatmung. Um die Funktion aufzustellen, hat Ryan Messungen der Erhaltungsatmung mit der jeweiligen Stickstoffkonzentration des Gewebes in Beziehung gesetzt. Hierbei ergeben sich zwei Probleme: Das erste Problem bezieht sich auf die zur Aufstellung der Funktion verwendeten Respirationsdaten, unter denen nur zwei Messungen an holzigen Geweben waren; beide wurden an Nadelbäumen durchgeführt. Zudem wurden die zugehörigen Stickstoffkonzentrationen an Vergleichsbäumen und nicht an den Bäumen der Respirationsmessung bestimmt. Das zweite Problem ist, dass die Messung einer Erhaltungsatmung faktisch nicht möglich ist, da bei der Messung der Respiration nicht ermittelt werden kann, zu welchem Zweck die mobilisierte Energie verwendet wird (siehe Abschnitt 3.1.6.1).

Neben diesen Schwierigkeiten besteht noch die Unsicherheit bezüglich der Stickstoffkonzentration in den lebenden Geweben der holzigen Kompartimente. Diese wurden in dieser Arbeit mit der der zugehörigen krautigen Kompartimente gleich gesetzt. Da in der vorliegenden Literatur bezüglich der Stickstoffkonzentration nicht zwischen lebendem und totem Holz unterschieden wird (die vielen Arbeiten aus dem forstwirtschaftlichen Bereich unterscheiden nach Nutzbarkeit), sind hier keine

gesicherten Daten zur Validierung zu bekommen.

Diese Unsicherheiten machen es schwierig, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Vegetationstypen im Hinblick auf den Grundumsatz zu diskutieren. Es lässt sich nicht trennen, ob die Unterschiede in verschiedenen Grundumsatzraten pro Stickstoff oder in fehlerhaften Annahmen über Stickstoffkonzentrationen im Holz liegen.

In CABIN ist der Grundumsatz derjenige Parameter, mit dem die NPP am stärksten zu beeinflussen ist. Hier tritt die höchste RVB auf (siehe Tabelle 4.16). Der Grundumsatz ist also von großer Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels.

5.3.9 Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern

Die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern hat nach den Ergebnissen dieser Arbeit nahezu keinen Einfluss auf die mit CABIN modellierte NPP. Unter Laborbedingungen konnte eine solche Herunterregulation der Photosynthese jedoch z. B. bei *Arabidopsis thaliana* gezeigt werden (Nakano et al., 2000; Sonnewald, 2001). Im Freiland in temperierten Breiten konnte sie jedoch nicht nachgewiesen werden (Zotz et al., 2005). Dies legt nahe, dass die Herunterregulation der Photosynthese nur unter günstigsten Bedingungen eine Rolle spielt. Eine Auswirkung auf die Jahres-NPP scheint wenig wahrscheinlich. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass CABIN durchgängig nur recht geringe relative Füllstände des Assimilatpools erzeugt (Abbildungen 4.5 c und 4.6 c).

Bei einer veränderten Beschreibung der Speicherung könnte die Auswirkung der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern also größer sein. Im Kontext von CABIN hat sie jedoch aktuell keine Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels.

5.3.10 Zusammenfassung und Fazit

Nach den Ergebnissen dieser Arbeit sind der respiratorischen Grundumsatz, die Stickstoffabhängigkeit der Respiration, die Referenztemperatur, die Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese und die Menge lebenden Gewebes im Holz in CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels von großer Bedeutung. Außerdem ist eine den Relationen zwischen den Vegetationstypen entsprechende Umsetzung des Referenztemperaturkonzeptes wichtig. Geringere Bedeutung hat die Parametrisierung der Kapazitäten der Kohlenhydratpools und der Remobilisierungsschwelle des Speicherungsmodells. Weiterhin nur geringe Bedeutung für die Modellierung haben nach den Ergebnissen dieser Arbeit Unterschiede in der Temperaturabhängigkeit der Respiration und der Optimumstemperatur der Photosynthese. Nahezu keinen Einfluss hat die Verringerung der Photosynthese mit zunehmender Füllung der Kohlenhydratspeicher.

Hier sei betont, dass sich die obige Liste nur auf das Modell CABIN bezieht. Die Übertragbarkeit auf andere Modelle oder die Verhältnisse in der Natur kann hier nicht beurteilt werden.

5.4 Global einheitliche Parametrisierung

Die in Abschnitt 1.4.2 aufgestellte Hypothese, es lasse sich eine global einheitliche Parametrisierung finden, die für alle Vegetationstypen zu einer realistischen modellierten NPP führt, kann für CABIN in seiner aktuellen Form nicht bestätigt werden. Es wurde kein Parametersatz gefunden, bei dem für alle Stationen eine gleichermaßen geringe Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP erreicht wurde. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine global einheitliche Parametrisierung grundsätzlich nicht möglich ist. Die Aussage gilt nur für CABIN und seine Prozessbeschreibungen in ihrer aktuellen Formulierung.

Für CABIN legen die Ergebnisse dieser Arbeit zunächst nahe, uneinheitliche Parameter für die Herleitung der Menge lebenden Gewebes, der Bestimmung des Grundumsatzes und eventuell der Speicherparameter zu verwenden. Es sollte jedoch primär versucht werden, diese Parameter über einheitliche Funktionen von Umweltbedingungen wie z. B. Klima oder Boden abhängig zu machen. Wo dies nicht funktioniert, könnte es möglich sein, durch Ergänzung von Prozessen, die bisher nicht in CABIN berücksichtigt werden, eine für eine einheitliche Parametrisierung geeignete Detaillierungsebene der Beschreibung des Systems zu erreichen. Außerdem könnte es notwendig werden, aufgrund vegetationstypspezifischer Anpassungen an Umweltbedingungen, Prozesse oder Abwandlungen von Prozessen in CABIN zu integrieren, die nur spezielle Vegetationstypen betreffen.

Aufgrund des häufig sehr geringen Angebots an Messdaten und der damit verbundenen Schwierigkeit, vegetationstypspezifische Parameter zu bestimmen, sollte zunächst versucht werden, die angesprochenen Methoden anzuwenden. Nur wenn diese nicht zum Erfolg führen, sollten vegetationstypspezifische Werte gesetzt werden, und dies auch nur, wenn es belegbare Begründungen dazu gibt.

Im folgenden Abschnitt werden zuerst einige potentiell wirkungsvolle Verfeinerungen der Detaillierungsebene vorgestellt. Es folgt die Darstellung einiger möglicher vegetationstypspezifischer Anpassungen (Abschnitt 5.4.2).

5.4.1 Verfeinerung der Detaillierungsebene

Grundlage für eine global einheitliche Parametrisierung ist es, eine dafür geeignete Detaillierungsebene in der Beschreibung der Prozesse zu schaffen, auf der Gemeinsamkeiten bestehen (siehe Abschnitt 1.4.2). Geeignete Bezugsgrößen müssen für Prozesse identifiziert werden, um die Ebene der Gemeinsamkeit zwischen verschiedenen Arten und Vegetationstypen zu finden.

Für ein global einzusetzendes Modell ist es oft nicht möglich, detaillierte Informationen über Zustandsgrößen der Vegetation an abgelegenen oder wenig untersuchten Orten zu bekommen. Dies schränkt die Auswahl der als Bezugsgrößen verwendbaren Größen ein.

Gerade bei globalen Modellen ist ein zusätzlicher Grad an Komplexität immer mit einem deutlichen Zuwachs an Rechenbedarf und damit Modellaufzeit verbunden. Da diese nur begrenzt zur Verfügung steht, erscheint es sinnvoll, eine global einheitliche Parametrisierung nur soweit zu verwirklichen, wie sie dazu beiträgt, das Modell einfach zu halten. Der mit zunehmender Komplexität eines Modells ansteigende Aufwand, Werte für zusätzliche, dann zwar einheitliche, Parameter zu bestimmen, darf nicht den Aufwand übersteigen, uneinheitliche Werte für eine geringere Zahl von Parametern zu finden, wenn dadurch nicht eine deutliche Verbesserung des

Modells erreicht wird.

In den folgenden Abschnitten werden Möglichkeiten zur Verfeinerung der Detailtiefe der Prozessbeschreibungen angesprochen, die so nicht in CABIN berücksichtigt sind. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Erweiterungen der enthaltenen Prozesse.

5.4.1.1 Isolierung durch Schnee

In saisonalen Klimaten, in denen im Winter teils über lange Zeiträume Schnee liegt, kann dieser einen isolierenden Effekt haben. Die Temperaturen der vom Schnee eingeschlossenen Teile der Vegetation und die der Wurzeln im Boden liegen so höher, als es ohne Schnee der Fall wäre. Hier könnte eine höhere Respiration die Folge sein, die zu einem erhöhten Verbrauch an Kohlenhydraten führen würde. Bei Messungen der gesamten Bodenatmung konnte von Grogan und Jonasson (2005, 2006) eine erhöhte CO₂-Abgabe unter Schnee gezeigt werden. Hier sollten sowohl die Respiration der Bodenorganismen, als auch die der Wurzeln beteiligt sein.

Ein verringernder Einfluss auf die modellierte NPP wäre in kalten Klimaten zu erwarten, wo CABIN die NPP überschätzt. Zur Berücksichtigung dieses Effektes sollte ein Schneemodell verwendet werden.

5.4.1.2 Photosynthesebeginn nach Kältephasen

In CABIN läuft die Photosynthese auch in und nach Perioden mit sehr kalten Temperaturen entsprechend der treibenden Kräfte ab. In der Natur kann es unter sehr kalten Bedingungen, wie sie in borealen und subarktischen Regionen auftreten, zu Unterbrechungen der Photosynthese durch Kälte kommen. Beschädigung der Chloroplasten und Inaktivierung von Photosystem II treten dabei auf (Strand und Öquist, 1985; Öquist und Strand, 1986). Die Regenerierung des Photosyntheseapparates kann dann acht und mehr Wochen benötigen bis wieder die volle Leistungsfähigkeit erreicht ist (Strand und Lundmark, 1995; Bergh und Linder, 1999). Ein solcher Effekt sollte zu einer Verringerung der modellierten NPP in kalten Klimaten führen und in CABIN der Überschätzung der NPP entgegen wirken.

5.4.1.3 Temperaturunterschiede zwischen den Organen

In CABIN wird für die gesamte Pflanze eine einheitliche Temperatur, nämlich die Lufttemperatur, angenommen. Dies entspricht besonders tagsüber nicht der Realität. Die Blatttemperaturen an der Bestandesoberfläche liegen oft um einige Grad über der Lufttemperatur. Blätter tiefer im Bestand und auch das Holz können gegenüber der Luft über dem Bestand bei direkter Einstrahlung geringere Temperaturen aufweisen. Auch die Temperaturen der Wurzeln sollten geringer sein. Dies würde in CABIN eine veränderte Respiration der holzigen Organe und beschatteten Blätter verursachen, was die modellierte NPP beeinflussen würde.

Eine weitere Ungenauigkeit in diesem Zusammenhang ist die Beschreibung der Abhängigkeit der Respiration von der Temperatur. Diese ist in CABIN für alle Kompartimente gleich. Wie in Abschnitt 3.1.6.2 beschrieben, wurde dies für Blätter und Wurzeln gezeigt. Es liegt jedoch keine Studie vor, in der dies auch für lebende Anteile des Holzes gezeigt wurde. Hier könnte die Annahme fehlerhaft sein.

5.4.1.4 Strahlungsabsorption und Effizienz der Nutzung

Eine weitere potentielle Fehlerquelle ist die Modellierung der Photosynthese mit einem big leaf Modell. Die implizite Annahme, dass der Stickstoff im Bestand proportional zur absorbierten Strahlung verteilt ist, wird angezweifelt (Friend, 2001). Je nach Strahlungssituation könnte so die Photosynthese falsch berechnet werden.

Auch die Beschreibung der Strahlungsabsorption im Photosynthesemodell (Gleichung 2.8) enthält starke Vereinfachungen. So wird die Reflektivität der Blätter auf null gesetzt und der Zusammenhang zwischen Chlorophyll- und Stickstoffkonzentration als konstant angenommen. Außerdem wird nicht berücksichtigt, dass auch Holz oder abgestorbene Pflanzenteile (z. B. im Grünland) Strahlung absorbieren, was nach Asner et al. (1998) zu berücksichtigen ist. Eine detailliertere Darstellung der Strahlungsabsorption könnte zur realistischeren Modellierung der NPP beitragen.

5.4.1.5 Nach Organen differenzierter Kohlenhydrathaushalt

Die Pools für Assimilate und Reservekohlenhydrate werden in CABIN nicht zwischen den Kompartimenten der Vegetation differenziert. Auch die Zugänglichkeit zu den Kohlenhydratressourcen wird als in der ganzen Pflanze gleich angenommen. Dies entspricht nicht den bekannten Messdaten, die besagen, dass die Kohlenhydrate sehr ungleichmäßig in Bäumen verteilt sein können (Barbaroux et al., 2003).

Der Export von Kohlenhydraten aus Blättern, die gerade Photosynthese betreiben ist recht konstant (Chapin et al., 1990). Sinkt die photosynthetische Aktivität so wird der Kohlenhydratexport durch Abbau von Stärke auf ähnlichem Niveau aufrecht erhalten (Geiger et al., 2000). Bei *Populus x canescens* konnten außerdem nur geringe Schwankungen im Kohlenhydratgehalt des Xylem gefunden werden (Mayrhofer et al., 2004). Ist dies allgemein zutreffend, so sollte die Zugänglichkeit zu den Assimilaten in den einzelnen Kompartimenten der Pflanze durch die Aufnahme aus dem Xylem (oder Phloem) und die Verteilung des aufgenommenen Kohlenstoffs auf Metabolismus oder Speicherung variieren. Die für CABIN gemachten Vereinfachungen bei der Beschreibung des Kohlenstoffhaushalts können also dazu führen, dass die Respiration einzelner Kompartimente durch die Annahme eines unrealistischen Assimilatangebots über- oder unterschätzt wird.

Die mechanistische Modellierung des räumlich-zeitlichen Umlagens von Ressourcen oder von Speicherung und Allokation erfordert ein umfassendes Wissen über die Bedingungen, unter denen Kohlenhydrate zwischen und innerhalb der Kompartimente transportiert werden. Ein solches Wissen existiert zur Zeit noch nicht.

Auch die Energie, die für Transportprozesse benötigt wird, ist in CABIN pauschal als im Grundumsatz enthalten angenommen, was zu einer falschen Einschätzung des Energiebedarfs beitragen könnte.

Das Speicherungsmodell von CABIN ist sehr statisch realisiert. Weder die Remobilisierungsschwelle und die Speicherkapazitäten noch die Parameter des Speicherungs- und des Remobilisierungsflusses ändern sich dynamisch. Dies könnte speziell bei saisonalen Vegetationstypen Einfluss auf die Kohlenstoffbilanz haben. Es ist davon auszugehen, dass in der Realität eine zeitliche Regelung dieser Prozesse existiert und zu verschiedenen Zeiten bevorzugt gespeichert oder allokiert wird. Ein auf gesichertem Wissen über diese Prozesse basierendes Modell sollte die Qualität der Modellierung der Kohlenstoffbilanzen verbessern können.

5.4.1.6 Temperaturakklimatisierung

Die Existenz einer Temperaturakklimatisierung von Photosynthese (Berry und Björkmann, 1980) und Respiration (Atkin und Tjoelker, 2003) ist heute akzeptiert. Sie kann als Verschiebung der Referenztemperatur verstanden werden (Long, 1985). Eine solche Verschiebung führt zu verringerten Differenzen zwischen der herrschenden und der Referenztemperatur. Die Akklimatisierung hat auf diese Weise eine Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanzen, da sich so die gegenüber der Photosynthese stärkere Temperaturabhängigkeit der Respiration weniger stark auswirkt.

Unterschiede bezüglich der Akklimatisierungsfähigkeit zwischen Vegetationstypen, Standorten der gleichen Art und sogar zwischen aufeinanderfolgenden Jahren am gleichen Standort sind in der Literatur besprochen worden (Long, 1985; Luomala et al., 2003; Atkin et al., 2005; Lee et al., 2005, und Zitate darin). Eine exakte Modellierung dieser Zusammenhänge wird jedoch erst möglich werden, wenn die Akklimatisierung und ihre Heterogenität besser verstanden sind. Eine genaue Aussage über die Bedeutung der Akklimatisierung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanzen ist daher nicht möglich. In saisonalen Klimaten ist jedoch eine merkliche Auswirkung zu erwarten, da hier große Differenzen zwischen der herrschenden Temperatur und einer statischen Referenztemperatur auftreten.

Durch die gerade in der borealen Zone oft deutlich unter der statischen Referenztemperatur liegenden Temperatur wird die Respiration in CABIN stärker verringert, als die Photosynthese. Die Akklimatisierung würde hier durch die Verstärkung der Respiration zu erhöhtem Kohlenstoffverbrauch und damit geringeren Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP führen.

5.4.2 Anpassungen an Umweltbedingungen

Vegetationstypspezifische Anpassungen an Bedingungen, wie zum Beispiel das Klima oder die Nährstoffversorgung, können Erweiterungen in CABIN notwendig machen, die die bestehenden allgemeinen und über viele Vegetationstypen gültigen Beschreibungen der Prozesse ergänzen. Es handelt sich dabei um zusätzliche Prozesse oder Abwandlungen von Prozessen, die sich bei speziellen Vegetationstypen unter bestimmten Umweltbedingungen evolutiv entwickelt haben. Diese würden CABIN erweitern, widersprechen aber nicht der Möglichkeit, grundsätzlich Prozesse global einheitlich beschreiben und parametrisieren zu können.

Drei solcher Anpassungen werden im Folgenden vorgestellt.

5.4.2.1 Kohlenstoffeinsparung

CABIN hat speziell im tropischen Regenwald Probleme, eine positive Kohlenstoffbilanz zu erreichen. Es könnten dort Anpassungen, die der Einsparung von Kohlenstoff dienen, also den Kohlenstoffbedarf der Pflanze verringern, vorkommen, die in CABIN nicht berücksichtigt sind. Dies müsste im Holz mit Umstrukturierungen einhergehen, da die Stabilität des Baumes gewährleistet bleiben muss.

Eine mögliche Anpassung wäre eine Leichtbauweise, wie z. B. bei Balsa, um die nötige Stabilität des Holzes mit einem geringeren Einsatz von Kohlenstoff zu erreichen. Dies hätte den Vorteil, dass zur Erhaltung der Stabilität bei zunehmender Masse ein geringerer Teil des lebenden Gewebes zu stabilisierendem Holz umgewandelt werden müsste. Da Aufgrund der fehlenden Winterperiode keine jährliche

Neubildung von Leitungsgefäßen notwendig ist, wäre dies in durchgängig warmen Vegetationstypen eine günstige Anpassung.

In tropischen Wäldern finden sich bei vielen Bäumen Brettwurzeln. Diese Wurzeln erhöhen die Stabilität eines Stammes, ohne dass im gesamten Umfang Dickenwachstum stattfinden muss. Dies könnte als Anpassung zur Kohlenstoffeinsparung durch Verringerung des notwendigen Volumens interpretiert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Einsparung von Kohlenstoff ist dessen Ersatz durch andere Elemente. Für eine Reihe von Arten ist bekannt, dass sie Silizium in ihre Gewebe einlagern, insbesondere auch bei tropischen Bäumen (Pettersen, 1984). Im Holz kann Silizium eine ähnliche stabilisierende Funktion wie Lignin übernehmen (Eppstein, 1999). Es hat zusätzlichen den Vorteil, dass die energetisch sehr kostspielige Bildung von Lignin so reduziert werden kann (Raven, 1983). Es ergibt sich also der doppelte Vorteil von geringerem C-Bedarf zur Strukturbildung und geringerer Energieaufwendung.

Über Siliziumgehalte von Holz sind in der vorliegenden Literatur nicht viele Daten zu finden. Eine Messreihe an Teak-Bäumen entlang eines Höhen transekts ergab mit zunehmender Höhe abnehmende Siliziumgehalte (Kjaer et al., 1999). Da mit der Höhe auch die Temperaturen abnehmen und mit abnehmenden Temperaturen nach den Ergebnissen von CABIN positivere C-Bilanzen auftreten (Abschnitt 5.3.1) und so die Notwendigkeit von Kohlenstoffeinsparungen geringer wird, könnte dies als Anlass genommen werden, hier weitere Untersuchungen in diese Richtung anzustellen.

Mit den zur Verfügung stehenden Daten lässt sich die Bedeutung der Möglichkeiten Kohlenstoff einzusparen noch nicht beurteilen.

5.4.2.2 Wurzeltiefe und Dormanz

Die Verfügbarkeit von Bodenwasser nimmt in GIWACOM Einfluss auf die Leitfähigkeit der Stomata. In der Natur hat die Wurzeltiefe einen großen Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit. Tiefwurzler können auch zu Trockenzeiten noch an Grundwasser gelangen (Canadell et al., 1996), was speziell in Savannen dazu führen kann, dass in der Trockenzeit gegenüber der Regenzeit erhöhte Stomataleitfähigkeiten gemessen werden (Eamus und Prior, 2001). Da die Wurzeltiefe in der in dieser Arbeit verwendeten Version 2.11 von GIWACOM nicht berücksichtigt wird (siehe Esser und Hoffstadt, 2000), könnte so die Photosynthese in Trockenzeiten unterschätzt werden. Nach Malhi et al. (1999) ist das Bodenwasserangebot neben der Strahlung die bedeutendste Einflussgröße für die Produktivität tropischer Wälder. Hier ist auch eine Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz anzunehmen.

Bei Vegetationstypen, die Trockenzeiten erfahren, ist davon auszugehen, dass die Pflanzenarten daran angepasst sind. Solche die keine tiefen Wurzeln ausbilden, können oft in einen Ruhezustand (Dormanz) verfallen. Im Zustand der Dormanz wird der gesamte Metabolismus auf das lebensnotwendige Minimum heruntergefahren, so dass zumindest an Blättern kein Gaswechsel mehr messbar ist (gezeigt durch noch unveröffentlichte Messungen der AG Esser in Südfrankreich). Unter solchen Umständen werden Kohlenhydrate gespart, die dann bei günstigen Bedingungen zur Energiegewinnung oder als Substrat zur Strukturreneubildung verwendet werden können. Da Dormanz in CABIN nicht berücksichtigt ist, besteht die Möglichkeit, dass bei Vegetationstypen, in denen Arten dormante Phasen aufweisen, die NPP unterschätzt wird.

Winterdormanz, die in den saisonalen temperierten und kalten Vegetationszonen auftritt, ist hier von geringerer Bedeutung, da dort die niedrigen Temperaturen zur Verlangsamung des modellierten Metabolismus führen.

Das Einleiten von Dormanz ist wie auch das Austreiben oder Abwerfen von Blättern sowie die Regelung der Bildung neuer Strukturelemente und der Speicherung ein Vorgang, der auf genetisch determinierter Basis zeitlich geregelt ist (Goulden et al., 2004). Für eine Beurteilung der Bedeutung der Dormanz für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels wäre ein umfassendes Verständnis der Regulation der Dormanz und des Energieverbrauchs in dormanten Phasen notwendig.

5.4.2.3 Zusammenhang der Respiration mit der Stickstoffkonzentration

Ein weiterer Punkt, der zu Fehlern in der modellierten NPP führen kann, ist die für CABIN gemachte Annahme, dass die Abhängigkeit der Respiration von der Stickstoffkonzentration überall gleich ist (Abschnitt 3.1.6.3). Die Stickstoffabhängigkeit der Respiration wird in CABIN über alle Vegetationstypen, funktionellen Typen und Kompartimente der Vegetation als gleich angenommen. Für *Pinus radiata* konnte jedoch gezeigt werden, dass die Respiration pro Stickstoff in Feinwurzeln höher als in Blättern ist (Ryan et al., 1996; Reich et al., 1998c). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Vose und Ryan (2002) für *Pinus strobus*. Auch sie fanden eine höhere stickstoffbezogene Respiration in der Wurzel als im Blatt. Die geringsten Werte zeigten sich dort im Holz, wobei jedoch nicht berücksichtigt wurde, dass auch in dessen toten Anteil Stickstoff enthalten sein kann. Für laubabwerfende Arten wurde bezüglich der Respiration von Blättern und Wurzeln eine demgegenüber umgekehrte Tendenz gefunden (Masarovičová et al., 2000). Diese Ergebnisse deuten auf Unterschiede in der Stickstoffabhängigkeit der Respiration zwischen den Kompartimenten hin. Zusammen mit den Unsicherheiten bezüglich der Stickstoffkonzentrationen selber ist hier ein deutlicher Einfluss auf die modellierte NPP möglich. Auch die Art der Funktionen, mit der die Abhängigkeiten von Photosynthese und Respiration vom Stickstoffgehalt zu beschreiben sind, ist nicht sicher.

5.5 Ausblick

Es ist unwahrscheinlich, dass ein einzelner der als bedeutend gefundenen Parameter oder der als potentiell bedeutsam vorgeschlagenen zusätzlichen Detailbeschreibungen und Anpassungen für die Abweichungen zwischen modellierter und gemessener NPP verantwortlich ist. Vielmehr ist zu erwarten, dass eine Kombination aus mehreren oder gar allen dieser Punkte zu einer Formulierung und Parametrisierung von CABIN führt, die in allen Vegetationszonen eine realistische NPP simuliert.

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen einige Ansätze für das weitere Vorgehen und für weiterführende Forschungs- und Datenerhebungsprojekte nahe.

5.5.1 Weiteres Vorgehen

5.5.1.1 Parametrisierung

Da die Referenztemperatur einen großen Einfluss auf die modellierte NPP hat, könnte versucht werden, über die Methode der inversen Modellierung geeignete Werte für

die Vegetationstypen an ihren jeweiligen auch innerhalb des selben Typs verschiedenen Standorten zu ermitteln. Es sollte dann versucht werden, einen allgemeinen Zusammenhang zwischen den Referenztemperaturen und den Bedingungen (Klima, Boden etc.) am jeweiligen Standort aufzustellen.

Um die Menge lebenden Gewebes im Holz, den Grundumsatz und eventuell auch die Speicherparameter simultan für jeweils einen Vegetationstyp an die Messdaten anzupassen, empfiehlt sich die Methode von Knorr und Kattge (2005). Diese auf einem stochastischen Verfahren basierende Methode ermöglicht es, auch dann Werte herzuleiten, wenn mehr Parameter zu bestimmen sind, als Vergleichsdaten zur Verfügung stehen. Auch hier kann dann versucht werden, aus den für die verschiedenen Vegetationstypen und Standorte bestimmten Werten allgemeine Zusammenhänge mit Standortbedingungen herzustellen.

Das auf diese Weise parametrisierte CABIN sollte dann in der Lage sein, die NPP-Messdaten angemessen zu reproduzieren. Als dann folgender Schritt würde die dynamische Kopplung an NCIM erfolgen.

5.5.1.2 Modellerweiterungen

Auf der Basis von Daten aus der Literatur sollten Wurzeltiefen berücksichtigt werden, um dem Wassermodul des Stomatamodells zu ermöglichen, Effekte von Trockenheitsanpassungen einzubeziehen.

Auch ein einfaches Modul zur Berücksichtigung der Effekte extremer Kälte auf die Photosynthese sollte ergänzt werden. Außerdem sollte ein geprüftes Schneemodell angekoppelt werden, um den Einfluss der Isolierung auf die Respiration berücksichtigen zu können. Auch die weiteren in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 vorgeschlagenen Erweiterungen sollten in Betracht gezogen werden.

5.5.2 Datenerhebung

Um längerfristig die Respiration nicht grüner Pflanzenteile besser in CABIN repräsentieren zu können, ist es notwendig, in verschiedenen Vegetationstypen an den jeweils bedeutendsten Arten Messungen vorzunehmen. Es sollte die Menge lebenden Gewebes, die Stickstoff- und Kohlenhydratkonzentration sowie die respiratorische Aktivität bestimmt werden. Zusätzlich sollte der Siliziumgehalt im Holz gemessen werden, um die Rolle des Silizium bei der Kohlenstoffeinsparung einschätzen zu können.

5.5.3 Forschungsbedarf

Für die Modellierung des pflanzlichen Gaswechsels und Kohlenstoffhaushalts besteht nach den Ergebnissen dieser Arbeit Bedarf an einem besseren Verständnis der Respiration und ihrer Regulation. Außerdem wird vertieftes Wissen über die Dormanz unter winterkalten und sommertrockenen Verhältnissen und über die Bedingungen, die zu Eintritt und Auflösung dieses Zustandes führen sowie über den Energiebedarf während der Dormanz benötigt. Außerdem wären zusätzliche Daten und Erkenntnisse im Bereich der Akklimatisierung der Prozesse des Kohlenstoffgaswechsels an sich verändernde Temperaturbedingungen notwendig.

Forschung in den genannten Bereichen würde Möglichkeiten der Weiterentwicklung von CABIN verbessern und weitere Schritte hin zur Berücksichtigung ein-

flussreicher Prozesse bei der Modellierung der Kohlenstoffbilanz der Vegetation ermöglichen.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Das Umweltsystem der Erde besteht aus den in sich und untereinander hochgradig rückgekoppelten Teilsystemen der Biosphäre, der Atmosphäre und den Ozeanen. Änderungen in einem der Teilsysteme wirken sich zwingend auch auf die anderen aus. Aktuell wird ein voranschreitender in hohem Maße auf der Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration beruhender Klimawandel beobachtet. Dieser wirkt sich über veränderte Wetterbedingungen in der Atmosphäre auch auf die Biosphäre und die Ozeane aus.

Ein geeignetes Werkzeug um mögliche zukünftige Entwicklungen des gesamten Erdsystems zu untersuchen, sind gekoppelte mathematische Modelle der Teilsysteme. In der vorliegenden Arbeit werden Elemente des Teilsystems der terrestrischen Biosphäre behandelt. In bestehenden Modellen der Kohlenstoffbilanz der terrestrischen Biosphäre sind bedeutende Prozesse und Limitierungen häufig noch nicht berücksichtigt. Insbesondere werden Photosynthese und Respiration meist nicht separat modelliert und die mögliche Limitierung der Bildung struktureller Phytomasse aus Mangel an Assimilaten wird nicht mit einbezogen.

Um auch diese Aspekte berücksichtigen zu können, wurde in dieser Arbeit das Modell CABIN (CARbon Balance Influenced by Nitrogen) entwickelt. Es kann als Modell der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels zur Berechnung der Nettoprimärproduktivität (NPP) der Vegetation an Modelle des interagierenden globalen Kohlenstoff- und Stickstoffkreislaufs gekoppelt werden. CABIN verwendet als Modell der stomatären Leitfähigkeit GIWACOM und als Modell der stickstoffabhängigen Photosynthese den Ansatz von Kull und Kruijt. Für CABIN neu entwickelt wurden auf globaler Ebene anwendbare Modelle der von Stickstoff und Kohlenhydratversorgung abhängigen pflanzlichen Respiration, der Kohlenstoffspeicherung und der von Energie- und Substratversorgung abhängigen Bildung von struktureller Phytomasse (Allokation). In CABIN füllt die Photosynthese einen Pool von Assimilaten, aus dem Respiration, Allokation und Speicherung Kohlenstoff entnehmen. Als Reserve gespeicherter Kohlenstoff kann durch Remobilisierung wieder als Assimilat den anderen Prozessen zugänglich gemacht werden.

Um die aufgezählten Teilmodelle betreiben zu können, wurden zusätzlich Ansätze zur Bestimmung der Optimumstemperatur der Photosynthese, der Menge lebenden Gewebes im Holz und der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern entwickelt.

Alle Teilmodelle wurden für die vorliegende Arbeit implementiert und parametrisiert.

Es wurde eine global einheitliche Parametrisierung von CABIN angestrebt. Dabei wurde versucht, die Werte für die Parameter der Modellgleichungen möglichst nicht vom Vegetationstyp abhängig zu machen, sondern über alle Vegetationstypen konstant zu halten, oder von örtlichen Gegebenheiten wie Boden oder Klima abzuleiten.

CABIN wurde für diese Arbeit für die Vegetationstypen Tundra, borealer Wald, temperierter Wald, Steppe, mediterrane Vegetation, Savanne, Trockenwald, tropischer Regenwald und Wüste angewandt. Es wurden dazu Orte ausgewählt, für die Messdaten der NPP vorliegen.

Die Teilmodelle für Photosynthese, Respiration und der Ansatz zur Abschätzung der Menge lebendes Gewebes im Holz konnten erfolgreich anhand von Messdaten geprüft werden. In Ermangelung geeigneter Messdaten war dies für die anderen Teilmodelle nicht möglich.

Zwischenergebnisse wurden für einen borealen und einen tropischen Wald geprüft. Sowohl im tropischen Regenwald als auch im borealen Nadelwald berechnet CABIN für die Photosynthese, die Respiration und die interzelluläre CO_2 -Konzentration plausible Werte. Die Leitfähigkeit der Stomata wird eher unterschätzt. Im borealen Wald bilden sich große Kohlenhydratreserven wohingegen die Kohlenhydratspeicher im tropischen Regenwald nahezu leer bleiben.

Die mit CABIN modellierte NPP wurde mit Messwerten der NPP verglichen. Die auftretenden Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP sind für Messorte mit hoher mittlerer Jahrestemperatur negativ. Bei mittleren Jahrestemperaturen zwischen 13°C und 22°C streuen sie um null; bei geringeren mittleren Jahrestemperaturen treten positive Abweichungen auf. Die modellierten mittleren jährlichen Kohlenhydratspeicherpools korrelieren mit der Abweichung der modellierten von der gemessenen NPP, wobei geringe Poolgrößen mit negativen und hohe mit positiven Abweichungen zusammentreffen.

Für Betrachtungen im Hinblick auf die Ursachen der auftretenden Abweichungen und für die Untersuchung der Bedeutung ausgewählter Parameter von CABIN für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels wurden die Werte dieser Parameter variiert. Der Einfluss dieser Variierungen auf die Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP und die Sensitivität von CABIN bezüglich der Parameter wurden untersucht.

Eine hohe Bedeutung für die Modellierung der Kohlenstoffbilanz des pflanzlichen Gaswechsels mit CABIN wird (in absteigender Reihenfolge) dem respiratorischen Grundumsatz, der Stickstoffabhängigkeit der Respiration, der eingesetzten Referenz- oder Anpassungstemperatur der Vegetation, der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese und der Menge lebenden Gewebes im Holz zugeschrieben. Geringere Bedeutung weisen die Parameter des Speicherungsmodells (Kapazitäten der Pools für lösliche und Reservekohlenhydrate sowie der Parameter zur Remobilisierung von Reservekohlenhydraten) und die Temperaturabhängigkeit von Photosynthese und Respiration auf. Nahezu keinen Einfluss auf die modellierte NPP hat die Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern.

Die eingesetzte global einheitliche Parametrisierung führt, wie an den Abweichungen der modellierten von der gemessenen NPP zu erkennen, nicht für alle Vegetationstypen zu plausiblen Modellergebnissen. Um hier die Leistungsfähigkeit von CABIN zu verbessern, wäre an geeigneten Stellen im Modell die Detaillierungsebene der Beschreibung des Systems zu verändern. Auch könnte es notwendig sein, vege-

tationstypspezifische Umweltanpassungen zu integrieren. Entsprechende Vorschläge werden diskutiert.

Anhang A

Symbole und Einheiten

In der Tabelle werden die in dieser Arbeit benutzten Symbole erklärt und deren Einheiten angegeben. Manche Größen werden zu Vergleichszwecken in mehreren unterschiedlichen Einheiten verwendet.

$\%KH$	jährlicher mittlerer relativer Füllstand eines Kohlenhydratpools	%
a	Anzahl benötigter Elektronen zur Fixierung eines Moleküls CO_2	$\mu\text{mol e}^\ominus \mu\text{molC}^{-1}$
A_j	lichtgesättigte durch die Elektronentransportkapazität limitiert Photosynthese	$\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$
A_h	lichtlimitierte Photosynthese	$\mu\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A_{ph}	Bestandesphotosynthese	$\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$ oder $\mu\text{molC m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$ oder $\text{gC m}_{leaf}^{-2} \text{a}^{-1}$
A_{sat}	Photosynthese bei Lichtsättigung, stickstoffbezogen	$\mu\text{molC gN}^{-1} \text{s}^{-1}$
A_v	lichtgesättigte CO_2 -limitierte Photosynthese	$\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$
$Allok$	Allokationsfluss	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
$Assim$	Assimilatpool	gC m^{-2}
$[Assim]$	Assimilatkonzentration	$\text{mgC}_{KH} \text{gC}^{-1}$
α	Quanteneffizienz der Photosynthese für CO_2	$\mu\text{molC } \mu\text{E}^{-1}$
b_{rN}	empirischer Parameter zur Berechnung des Respirationskoeffizienten	gN gC^{-1}
c_a	CO_2 -Konzentration in der Außenluft	$\mu\text{l l}^{-1}$
c_i	CO_2 -Konzentration in den Interzellularen	$\mu\text{l l}^{-1}$
C_{ha}	Kohlenstoffpool im oberirdischen krautigen Kompartiment	gC m^{-2}
C_{hb}	Kohlenstoffpool im unterirdischen krautigen Kompartiment	gC m^{-2}
C_{in}	Kohlenstoffpool in den Interzellularen	$\mu\text{molC gDW}^{-1}$

C_{wa}	Kohlenstoffpool im oberirdischen holzigen Kompartiment	gC m^{-2}
C_{wb}	Kohlenstoffpool im unterirdischen holzigen Kompartiment	gC m^{-2}
$C_{wa,l}$	Menge Kohlenstoff im lebenden Gewebe des oberirdischen holzigen Kompartimentes	gC m^{-2}
$C_{wb,l}$	Menge Kohlenstoff im lebenden Gewebe des unterirdischen holzigen Kompartimentes	gC m^{-2}
$\Delta elev$	Höhenunterschied zwischen Wetterstation und NPP-Messort	m
$\Delta[N]$	Abweichung von der Standardstickstoffkonzentration	gN gC^{-1}
ΔNPP	Änderung der modellierten NPP gegenüber einem Referenzlauf	%
ΔS	Entropiefaktor (Temperaturabhängigkeit der Photosynthese)	$\text{kJ K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
e_{mol}	molare Transpiration	$\mu\text{mol gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$
E_a	Aktivierungsenergie (Temperaturabhängigkeit der Photosynthese)	kJ mol^{-1}
FI	Feuchteindex zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials	skalar
\overline{FI}	Die Vergangenheit berücksichtigender Mittelwert von FI	skalar
$F_{As \rightarrow R}$	Speicherungsfluss	$\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$F_{R \rightarrow As}$	Remobilisierungsfluss	$\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$
g_s	Leitfähigkeit der Stomata für Wasser	$\mu\text{mol gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$ oder $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Γ_*	Photokompensationspunkt: CO_2 -Konzentration, bei der Photorespiration und Photosynthese gleich sind	$\mu\text{l l}^{-1}$
H_a	beschreibt aufsteigenden Ast der Optimumsfunktion der Temperaturabhängigkeit der Photosynthese	kJ mol^{-1}
H_d	beschreibt absteigenden Ast der Optimumsfunktion der Temperaturabhängigkeit der Photosynthese	kJ mol^{-1}
I_0	Einstrahlung an der Oberfläche des Bestandes	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I_a	absorbierte Strahlung	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I_{pot}	potentielle Strahlung	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I_V	Strahlung aus dem Vorlagedatensatz	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I'_0	gemessene Strahlung an der Wetterstation	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I'_{pot}	potentielle Strahlung an der Wetterstation	$\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$

J_{max}	maximale Elektronentransportrate	$\mu\text{mol e}^{\ominus} \text{gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$
k_1	Parameter zur Berechnung von k_l	skalar
k_2	Parameter zur Berechnung von k_l	skalar
k_3	Parameter zur Berechnung von k_l	$\text{m}^2 \text{s} \mu\text{E}^{-1}$
k_4	Parameter zur Berechnung von k_l	skalar
k_a	Absorptionskoeffizient an Chlorophyll	$\text{m}_{leaf}^2 \mu\text{molChl}^{-1}$
k_{Assim}	Reduktionskoeffizient zur Verringerung der Photosynthese in Abhängigkeit von der Assimilatversorgung	skalar
k_c	kinetische Konstante der Rubisco für die Carboxylierung	$\mu\text{l l}^{-1}$
$k_{Chl,N}$	Menge Chlorophyll pro Stickstoff	$\mu\text{molChl gN}^{-1}$
k_{KapA}	Parameter zur Bestimmung der Kapazität des Assimilatpools	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1}$
k_{KapR}	Parameter zur Bestimmung der Kapazität des ResC-Pools	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1}$
k_l	Verringerungskoeffizient für die Blattrespiration bei Licht	skalar
k_o	kinetische Konstante der Rubisco für die Oxygenierung	$\mu\text{l l}^{-1}$
k_r	Respirationskoeffizient (allgemein)	s^{-1}
k_{rem}	Remobilisierungsschwelle	skalar
k_{rN}	empirischer Parameter zur Bestimmung des Respirationskoeffizienten	gC gN^{-1}
$k_{r,a}$	Respirationskoeffizient für die oberirdischen Kompartimente	s^{-1}
$k_{r,b}$	Respirationskoeffizient für die unterirdischen Kompartimente	s^{-1}
$k_{As \rightarrow R,0}$	Speicherungsparameter	s^{-1}
$k_{R \rightarrow As,0}$	Remobilisierungsparameter	s^{-1}
Kap	Kapazität eines Kohlenhydratpools	gC m^{-2}
Kap_A	Kapazität des Assimilatpools	gC m^{-2}
Kap_R	Kapazität des Reservekohlenhydratpools	gC m^{-2}
KH	Menge Kohlenhydrate	gC m^{-2}
LAI	Blattflächenindex	$\text{m}_{leaf}^2 \text{m}^{-2}$
M_{rN}	Maximalwert des Respirationskoeffizienten	s^{-1}
$M_{rN,Ref}$	Maximalwert des Respirationskoeffizienten bei Referenztemperatur	s^{-1}
MRF	mittlerer relativer Fehler	%
$N_{dw,rel}$	relativer Stickstoffanteil am Trockengewicht im toten Holz	skalar
N_{DW}	Blattstickstoffmenge bezogen auf das Trockengewicht	mgN gDW^{-1}

N_{ha}	Stickstoffpool des oberirdischen krautigen Kompartimentes	gN m^{-2}
N_{lim}	theoretisch lichtlimitierte Menge Blattstickstoff im Bestand	gN m^{-2}
N_{sat}	Menge Blattstickstoff im lichtgesättigten Teil des Bestandes	gN m^{-2}
N_{wa}	Stickstoffpool des oberirdischen holzigen Kompartimentes	gN m^{-2}
N_{wb}	Stickstoffpool des unterirdischen holzigen Kompartimentes	gN m^{-2}
$[N_{hb}]$	Stickstoffkonzentration im unterirdischen krautigen Kompartiment	gN gC^{-1}
$[N_{ha}]$	Stickstoffkonzentration im oberirdischen krautigen Kompartiment (Blattstickstoff)	gN gC^{-1}
$[N]$	Stickstoffkonzentration eines unbestimmten Kompartimentes	gN gC^{-1}
NPP	Nettoprimärproduktivität	$\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$
NPP_{ORNL}	gemessene NPP aus ORNL-Datensatz	$\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$
o_i	Sauerstoffkonzentration in den Interzellularen	$\mu\text{l l}^{-1}$
P	Niederschlag	mm
P_V	Niederschlag aus dem Vorlagedatensatz	mm
Ψ_r	Bodenwasserpotential	MPa
r	Reflektivität der Blätter	skalar
R	Respiration (allgemein)	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$ oder $\mu\text{molC gDW}^{-1} \text{s}^{-1}$
\mathcal{R}	allgemeine Gaskonstante	$\text{kJ K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
R_A	für Allokationsprozesse zur Verfügung stehende Respiration	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
R_{ges}	Gesamtrespiration	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$ oder $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$
R_G	Grundumsatz (allgemein)	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
$R_{G,ha}$	Grundumsatz des krautigen oberirdischen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
$R_{G,hb}$	Grundumsatz des krautigen unterirdischen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
$R_{G,ges}$	gesamter Grundumsatz	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
R_{ha}	Respiration des oberirdischen krautigen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$ oder $\mu\text{molC m}_{leaf}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_{hb}	Respiration des unterirdischen krautigen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
R_{wa}	Respiration des oberirdischen holzigen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
R_{wb}	Respiration des unterirdischen holzigen Kompartimentes	$\text{gC}_{KH} \text{gC}^{-1} \text{s}^{-1}$
$ResC$	Pool der Reservekohlenhydrate	gC m^{-2}

RF	Reduktionsfaktor zur Strahlungsberechnung	skalar
RVB	relative Variationsbreite	%
s	relative Füllstandsschwelle des Assimilatpools (Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern)	skalar
SLA	spezifische Blattfläche	$m_{leaf}^{-2} gC^{-1}$
T	Temperatur	K oder °C
T_{hkorr}	höhenkorrigierte Temperatur	°C
T_{max}	Tagesmaximumstemperatur	°C
T_{min}	Tagesminimumstemperatur	°C
$T_{V,max}$	Tagesmaximumstemperatur im Vorlagedatensatz	°C
$T_{V,min}$	Tagesminimumstemperatur im Vorlagedatensatz	°C
T_{opt}	Optimumstemperatur der Photosynthese	K
T_{Ref}	Referenztemperatur	K oder °C
T_{Rel}	relative Temperatur in Bezug auf eine absolute Spanne	skalar
T_V	mittlere Stundentemperatur im Vorlagedatensatz	°C
V_{cmax}	maximale Carboxylierungsrate der Rubisco	$\mu molC gDW^{-1} s^{-1}$
z	Exponent zur Regulierung des Einflusses der Assimilatkonzentration auf die Respiration	skalar

Anhang B

Modelle des globalen C- und N-Haushalts

In Anhang B werden die in der Einleitung (Abschnitt 1.4.3) angesprochenen Modelle des globalen C- und N-Kreislaufs mit einigen zusätzlichen Details vorgestellt.

B.1 CENTURY

In CENTURY ist in Abhängigkeit von der Vegetationsform eine maximale Produktivität vorgeschrieben, die mittels Funktionen von Bodentemperatur, Wasserangebot, Lichtgenuss, atmosphärischer CO₂-Konzentration und Nährstoffangebot herunter skaliert wird. Der assimilierte Kohlenstoff wird auf acht pflanzliche Pools verteilt. Im Waldmodul existiert ein festes Schema der Allokation auf die verschiedenen Pools, wobei die Blattmasse eine Funktion der lebenden Holzbiomasse ist. Letztere wird mittels einer empirischen Funktion aus der gesamten Holzmasse hergeleitet.

Die Aufnahme von Nährstoffen aus den mineralischen Pools des Bodens ist von der Wurzelphytomasse abhängig gemacht. Symbiotische Fixierung von molekularem Stickstoff findet in CENTURY nur statt, wenn die Aufnahme von mineralischem N nicht ausreicht, um den N-Bedarf der Vegetation zu decken. In diesem Fall wird die Fixierung von der C-Assimilation abhängig gemacht.

Zur Produktion von Bestandesabfall wird eine von der Bodenfeuchte abhängige Fraktion der Phytomassepools in Bestandesabfallpools überführt. Für verschiedene pflanzliche Gewebe wird hier unterschiedlich gute Abbaubarkeit angenommen. Übersteigt die Phytomasse einen festgelegten Wert, werden 10 % der Phytomasse (ohne Berücksichtigung der Blätter) zu Bestandesabfall.

CENTURY hat ein sehr detailliertes Bodenmodell, das die Bestandesabfallpools eingeschlossen, 13 Kohlenstoff- und 15 Nährstoffpools enthält. Der Abbau des Bestandesabfalls und die Mineralisierung der Nährstoffe erfolgt anhand einer poolspezifischen maximalen Abbaurrate, die über Temperatur und Wasserangebot skaliert wird. Für die primären Bestandesabfallpools spielt hier auch das Verhältnis von Lignin zu Stickstoff eine Rolle.

Für jeden Übergang von C in einen anderen Pool wird CO₂ frei (mikrobielle Atmung). Den C-Flüssen im Boden folgen entsprechende Flüsse der Nährstoffe. Die dabei mineralisierte Menge N richtet sich nach dem beim Poolübergang abgegebenen CO₂ und dem C:N-Verhältnis des Zielpools. Außerdem simuliert das Bodenmodell die Auswaschung von Stickstoff und organischem Bodenkohlenstoff und die Abgabe

gasförmiger N-Verbindungen (N_2 , N_2O , NO). Auch N_2 -Fixierung und atmosphärische Deposition sind berücksichtigt.

Um CENTURY zu betreiben werden zumindest folgende Daten benötigt: geographische Position, pH-Wert im Boden, Bodentiefe, Pflanzentyp, Vegetationsperiode und Klimaangaben über monatliche Mindest- und Höchsttemperaturen und die monatliche Niederschlagssumme.

B.2 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)

Die Produktivität wird in CASA von der absorbierten Strahlung abhängig gemacht. Diese wird aus dem NDVI (Rouse et al., 1973), einem satellitengestützt aufgenommenen Maß der ‚Grünheit‘ der Vegetation hergeleitet und über die herrschende Temperatur und Wasserversorgung skaliert. Bei der Verteilung des Kohlenstoffs auf die drei in CASA repräsentierten C-Pools der Phytomasse Blatt, Wurzel und Holz, wird jedem Pool der gleiche Anteil zugewiesen.

Der Stickstoffgehalt der Phytomassepools ergibt sich aus dem im Boden verfügbaren mineralischen N. Reicht dieses nicht aus, um ein festgelegtes maximales C:N-Verhältnis der Phytomasse zu bedienen, wird der gesamte verfügbare mineralische Stickstoff aufgenommen und es ergeben sich entsprechend geringere C:N-Verhältnisse.

Die Produktion von Bestandesabfall ist als Funktion der Phytomasse und einer vom Phytomassepool abhängigen Verweildauer des Kohlenstoffs implementiert; die Verteilung über die Zeit geschieht nach dem von einem Monat zum nächsten sinkenden Blattflächenindex (LAI). Anhand des im Bestandesabfall enthaltenen Stickstoffs wird dieser auf verschiedene Pools aufgeteilt. Die Pools des strukturellen schlecht abbaubaren Bestandesabfalls haben ein festgelegtes, die schnell abbaubaren ein freies C:N-Verhältnis.

Die Bodenprozesse sind als vereinfachte Version des CENTURY Modells (siehe Abschnitte 1.4.3.1 und B.1) eingebunden, wobei Schwefel und Phosphor unberücksichtigt bleiben. An gasförmigen Emissionen aus dem Boden werden N_2 , N_2O und NO simuliert. Es gibt kein komplexes Bodenwassermodell. Verwendet wird ein einfaches einschichtiges „Bucket-Modell“.

Um CASA zu betreiben werden Wetterdaten (Temperatur und Niederschläge), Informationen über die potentielle Evapotranspiration, eine Vegetationskarte, eine Karte der Bodentypen und Texturen und der NDVI in geeigneter zeitlicher Auflösung benötigt.

B.3 HYBRID

Die Produktivität wird als Differenz von Photosynthese und Respiration bestimmt. Die Photosynthese wird nach Farquhar et al. (1980) behandelt, wobei die Parameter des Modells eine Funktion des in Rubisco bzw. Chlorophyll gebundenen Stickstoffs sind. Die für dieses Photosynthesemodell benötigte CO_2 -Konzentration innerhalb des Blattes wird mit Hilfe des Modells der Stomataleitfähigkeit von Jarvis (1976) berechnet. Die Respiration der Pflanze bei Tag wird von der maximalen Carboxylierungsleistung der Photosynthese (V_{cmax} im Modell von Farquhar et al., 1980) abhängig gemacht. Die nächtliche Respiration ist für Blätter und Wurzeln eine Funktion der Temperatur und des Stickstoffgehaltes, für lebendes Holz eine Funktion der

Temperatur und der Kohlenstoffphytomasse. Ein festgelegter Anteil des Sapwood wird als lebend angenommen.

Ein Speicherpool dient bei den Bäumen zum Sammeln des aus der Differenz von Photosynthese und Respiration angehäuften C. Die Allokation des assimilierten Kohlenstoffs geschieht für die Bäume jährlich, für die Gräser jedoch täglich, weswegen dort kein Speicherpool existiert. Die Verteilung des Kohlenstoffs auf die einzelnen Pools der Phytomasse (bei Bäumen Blätter, Rinde + Sapwood, Heartwood, Feinwurzel; bei Gräsern ohne die holzigen Pools) geschieht nach festgelegten Allokationsverhältnissen in einer nach Prioritäten geordneten Reihenfolge. Um die Konkurrenzsituation der individuellen Pflanzen um Licht auf den Plots simulieren zu können, wird die Form (Höhe) der Pflanzen anhand von allometrischen Funktionen bestimmt.

Die Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden ist als Funktion von mineralischem N im Boden, Masse der Feinwurzeln, Temperatur und C:N-Verhältnis in der Pflanze realisiert. Bei der Verteilung des Stickstoffs auf die Phytomassepools werden festgelegte Relationen der C:N-Verhältnisse zueinander eingehalten.

Täglich für Gräser und jährlich für Bäume wird ein festgelegter Anteil jedes Pools zu Bestandesabfall. Nur für Blätter wird vor dem Übergang zum Bestandesabfall ein Teil des enthaltenen Stickstoffs in andere Pools retranslokiert. Ist die jährliche C-Bilanz eines Baumes negativ, so lässt das Modell das Individuum sterben und seine Phytomasse gelangt ebenfalls in den Pool des Bestandesabfalls.

Das Bodenmodell von HYBRID ist aus CENTURY (siehe oben) entnommen und leicht vereinfacht. Flüsse von Schwefel und Phosphor sind nicht berücksichtigt, ein zusätzlicher Pool ‚holziger Bestandesabfall‘ wurde eingeführt und die Zahl mineralischer N-Pools auf eins reduziert.

Die atmosphärische Deposition von Stickstoff und die Fixierung von molekularem N sind als konstant angenommen. Mineralisierung von Stickstoff wird als Folge des C-Übergangs zwischen verschiedenen Pools erzeugt und in Abhängigkeit von der Menge dabei veratmeten Kohlenstoffs und den C:N-Verhältnissen der Pools bestimmt. Die C-Flüsse im Boden werden so gelenkt, dass sich die C:N-Verhältnisse der einzelnen Pools vorgeschriebenen Werten möglichst annähern. Die Auswaschung von mineralischem Stickstoff und organischem Bodenkohlenstoff sowie die Abgabe gasförmiger N-Verbindungen erfolgt wie bei CENTURY (siehe oben).

Als Antriebsdaten für HYBRID werden täglich aufgelöste Minimums- und Maximumtemperaturen, Niederschläge, kurzweilige Einstrahlung und die Luftfeuchte benötigt. Zusätzlich müssen die atmosphärische CO₂-Konzentration, N₂-Fixierungs- und N-Depositionsraten, allometrische Zusammenhänge zwischen Phytomasse, Durchmesser und Höhe von Bäumen und das Verhältnis von Sättigungs- zu Feldkapazität im Boden gesetzt werden. Für letztere Datensätze sind im Modell Standardwerte vorgesehen.

B.4 BIOME-BGC

Die NPP wird in BIOME-BGC aus der Differenz von Photosynthese und Respiration berechnet. Die Photosynthese basiert auf einem Farquhar-Ansatz als big leaf Modell und wird durch die Stomataöffnungsweite und den Stickstoffgehalt beeinflusst. Die maximale Leitfähigkeitssumme des Bestandes bestimmt die Obergrenze der Photosynthese. Sie wird durch Bodenwasser, Sättigungsdefizit der Atmosphäre, Lufttem-

peratur und Strahlung bestimmt. Die maximale Elektronentransportrate wird aus der maximalen Carboxylierungsrate der Rubisco hergeleitet. Die Respiration hängt vom Kohlenstoffpool und der Temperatur ab.

Die Verteilung des Kohlenstoffs auf Wurzeln und Sprosse erfolgt nach dem Verhältnis von N-Aufnahme durch die Wurzeln zu Photosynthese, wobei bei Überschuss einer Ressource die Aufnahme der anderen durch Allokationsverschiebung gefördert wird. Allokation auf holzige Phytomasse ist an die Allokation auf die Blätter gekoppelt.

Die Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden wird durch eine vegetationsstypspezifische maximale Rate bestimmt, die durch Bodenwasser, Temperatur und Bodenfruchtbarkeit skaliert wird.

Die Bildung von Bestandesabfall erfolgt nach phänologischen Regeln und dem Verhältnis von der zur Erhaltung des Organs notwendigen Atmung zu Photosynthese.

Der Abbau von Bodenkohlenstoff und damit die Bodenatmung ist proportional zu den Bodenkohlenstoffpools verwirklicht. Der Abbau von Bestandesabfall richtet sich nach der Bodenfeuchte und -temperatur. Mineralisierung von Stickstoff aus dem Bestandesabfall findet nur statt, wenn das C:N-Verhältnis unter einen bestimmten Wert sinkt.

Genaue Informationen über den Stickstoffhaushalt in BIOME-BGC sind anscheinend nicht publiziert.

Um BIOME-BGC zu betreiben werden tägliche Informationen über die maximale, minimale und durchschnittliche Temperatur, die Tagesniederschlagssumme, die Luftfeuchte, die Strahlung und die Tageslänge benötigt. Außerdem braucht das Modell Daten der Bestandesmorphologie und Bodencharakteristika sowie der Stickstoffdeposition und -fixierung.

B.5 Terrestrial Ecosystem Model (TEM)

Die Phytomasse ist in TEM durch einen Kohlenstoff- und zwei Stickstoffpools (strukturell und mobil) repräsentiert. Die Nettoprimärproduktivität berechnet sich aus der Differenz der Photosynthese (GPP, gross primary production) und der pflanzlichen Respiration. Zur Bestimmung der GPP wird eine maximale jährliche Assimilationsrate durch Funktionen von Strahlung, Temperatur, Stomataleitfähigkeit, CO₂-Konzentration, Stickstoffverfügbarkeit und dem Verhältnis der aktuellen zur im Jahr maximalen Blattfläche skaliert. Die Stomataleitfähigkeit wird als relative Leitfähigkeit aus dem Quotient von potentieller und tatsächlicher Evapotranspiration berechnet. Das Stickstoffangebot nimmt in der Form Einfluss, dass die Produktivität verringert wird, wenn ein bestimmtes C:N-Verhältnis durch N-Mangel nicht erreicht werden kann. Dieses C:N-Verhältnis wird über eine empirische Funktion in Abhängigkeit von der Veränderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bestimmt.

Die mitochondriale Respiration wird als Summe einer Wachstums- und einer Erhaltungskomponente berechnet. Die Erhaltungsatmung ist dabei eine Funktion der Phytomasse und der Temperatur. Die Wachstumsatmung wird als 20% der Differenz von Erhaltungsatmung und GPP angenommen.

Bestandesabfall bildet sich in TEM anhand einer festgelegten Fraktion der Phytomasse, wobei aus dem strukturellen N-Pool der Vegetation Stickstoff in den mobilen

Pool resorbiert und dadurch davon ausgenommen werden kann.

Das Bodenmodell enthält einen Kohlenstoff- und zwei Stickstoffpools: organischen Stickstoff in Boden und Bestandesabfall und anorganischen freien Bodenkohlenstoff. Der Abbau des organischen Kohlenstoffs im Boden (mit heterotropher Respiration gleich gesetzt) ist als Funktion der Temperatur, der Bodenfeuchte und des Verhältnisses zwischen C und N bei der Produktion von Bestandesabfall realisiert. Die Mineralisierung des organischen Stickstoffs hängt vom Abbaufluss, vom C:N-Verhältnis der organischen Bodenpools und der Größe des anorganischen N-Pools im Boden ab.

Um TEM anzutreiben, werden Daten über die Vegetationsverteilung, die Höhe über dem Meeresspiegel, die monatliche Niederschlagssumme, die mittlere monatliche Temperatur, die mittlere monatliche Strahlung und die atmosphärische CO₂-Konzentration benötigt.

B.6 Nitrogen Carbon Interaction Model (NCIM)

In NCIM wird die Nettoprimärproduktivität (NPP) primär mit dem empirischen MIAMI Modell (Lieth, 1975) aus Niederschlags- und Temperaturdaten bestimmt. Anhand der Abweichung des aktuellen von einem gegebenen mittleren C:N-Verhältnis der Phytomasse wird dieser Wert anschließend korrigiert. Der Kohlenstoff wird anhand festgelegter Allokationsparameter auf die vier Kompartimente krautig-oberirdisch, holzig-oberirdisch, krautig-unterirdisch und holzig-unterirdisch verteilt. In der Vegetation sieht NCIM für jeden C- einen analogen N-Pool vor. Außerdem existiert ein Pool für Reservestickstoff. Die Verteilung von Stickstoff auf die vier Kompartimente geschieht in Abhängigkeit des N-Speichers der Vegetation, der Kohlenstoff-NPP und des C:N-Verhältnisses des jeweiligen Kompartimentes.

Die Aufnahme von N in die Vegetation aus dem Boden ist eine Funktion der Temperatur, des pflanzlichen N-Speicherpools, des N-Angebots im Boden und der Kohlenstoffphytomasse der Blätter. Aufgenommener Stickstoff gelangt primär in einen Speicherpool. Zwei weitere Flüsse in diesen Pool hinein sind die symbiotische N₂-Fixierung durch Rhizobien (bei Leguminosen) und durch Azospirillum-Symbionten (bei C₄-Gräsern). Die Fixierung ist eine Funktion der NPP. Der Anteil an NPP der durch Leguminosen oder C₄-Gräser geleistet wird, ist für jeden Vegetationstyp festgelegt.

Die Produktion von Bestandesabfall verläuft anhand eines vom Vegetationstyp abhängigen mittleren Bestandesalter abhängigen Koeffizienten. Stickstoff gelangt proportional zu C in den Bestandesabfall. Im Falle des oberirdischen krautigen Kompartimentes (Blätter) kann N zurück in den Stickstoffreservpool der Vegetation transportiert werden.

Der Boden beinhaltet jeweils einen N- und C-Pool für Humus und Mikroorganismen. Außerdem existiert ein Pool des verfügbaren mineralischen Stickstoffs und ein C-Pool für Lignin. Der Abbau von Bestandesabfall erfolgt anhand des C:N-Verhältnisses, der Temperatur und des Niederschlags. Proportional dazu verläuft der Abbau von Humus. Bei beiden Prozessen gehen jeweils gleiche Fraktionen der C- und N-Pools in den Pool der Bodenmikroorganismen über. Die grundlegende heterotrophe Respiration der Bodenorganismen ist von der Temperatur und dem C-Pool der Mikroorganismen abhängig. Zusätzliche CO₂ Abgabe durch Bodenorganismen erfolgt bei C-Überschuss (entsteht z. B. durch Mineralisierung) und durch deren Tod. Die

beiden letzteren Flüsse sind für Stickstoff analog implementiert.

Verlust von Stickstoff aus dem System geschieht durch Auswaschung aus dem Boden oder durch Abgabe von gasförmigem Stickstoff (Summe von N_2O und N_2) und ist abhängig vom Klima und dem C:N-Verhältnis des oberirdischen krautigen Bestandesabfalls. Die Deposition von Stickstoff aus der Atmosphäre ist berücksichtigt. Es existiert, von einem für ein bestimmtes Jahr räumlich aufgelösten Datensatz ausgehend, eine Routine zur Extrapolierung der Deposition auf andere Jahre anhand von räumlich aufgelösten Korrekturfaktoren.

Zum Betreiben von NCIM werden monatliche Daten zu Niederschlag und Temperatur benötigt. Außerdem werden räumlich aufgelöste Daten zur N-Deposition und zur Bodentextur benötigt, für die Standardwerte vorliegen.

Anhang C

Wetterdaten

Die zum Antrieb von CABIN verwendeten Wetterdaten wurden aus gemessenen Stationsdaten hergeleitet. In diesem Abschnitt werden die dazu angewandten Methoden dargestellt. Abschließend werden die Resultate einer einfachen Validierung der hergeleiteten Daten gezeigt.

C.1 Herleitung der Strahlungsdaten

C.1.1 Quelle der Messdaten.

Die Messdaten zur Strahlung stammen aus zwei Quellen: Dem Baseline Service Radiation Network (BSRN) und dem World Radiation Data Center der WMO (WRDC). Von beiden Quellen wurden Daten zur Globalstrahlung verwendet. BSRN bietet diese in Auflösungen unter einer Stunde an während die Daten von WRDC in täglicher Auflösung vorliegen. Die Zuordnung der Wetterstationen, von denen Strahlungsdaten verwendet wurden, zu den NPP-Stationen ist in Tabelle 3.4 auf Seite 46 aufgeführt. Tabelle C.1 zeigt die Zeiträume, für die für die einzelnen Wetterstationen Messdaten der Globalstrahlung vorliegen. Zur besseren Überschaubarkeit wurde dort eine zeitliche Auflösung von Monaten gewählt, wobei ein Monat dann aufgeführt wurde, wenn für mindestens die Hälfte der Tage gültige Daten vorhanden sind.

C.1.2 Berechnung der Strahlung an den NPP-Stationen.

Der Ort, für den Messdaten der Strahlung vorliegen, liegt bei vielen NPP-Stationen weit entfernt (siehe Tabelle 3.4), wodurch die Strahlungssituationen an diesen zwei Orten nicht als identisch angenommen werden können. Um dieses Problem zu lösen, wird für beide Orte die potentielle Strahlung an der Erdoberfläche berechnet (siehe Abschnitt C.1.5). Es wurde angenommen, dass an beiden Orten der gleiche relative Anteil dieser potentiellen Strahlung die Vegetation erreicht. Daher wurden für die Wetterstationen Reduktionsfaktoren RF der potentiellen Strahlung als Verhältnis von potentieller zu tatsächlicher Strahlung bestimmt:

$$RF = \frac{I'_0}{I'_{pot}} \quad (\text{C.1})$$

I'_{pot} steht hier für die zur aktuellen Tages- und Jahreszeit maximal mögliche, potentielle photosynthetisch aktive Strahlung an der Wetterstation (siehe Abschnitt C.1.5). I'_0 ist die tatsächliche an der Wetterstation gemessene Strahlung.

Tabelle C.1: Verfügbarkeit von Messdaten an den zur Herleitung der Strahlungsdaten verwendeten Wetterstationen. Angegeben sind die Jahre, für die Daten zur Verfügung stehen. Bei Jahren mit unvollständigen Daten sind die Monate mit vorhandenen Daten angegeben. Für die in minütlicher oder dreiminütiger Auflösung vorliegenden Daten der Stationen BAR und DRA wurden die Angaben zur Verfügbarkeit unter den Kriterien erstellt, dass eine verfügbare Stunde für mindestens die Hälfte der Datenpunkte einen gültigen Wert besitzt, ein verfügbarer Tag für mindestens die Hälfte der Stunden und ein verfügbarer Monat für mindestens die Hälfte der Tage. Letzteres Kriterium wurde auch für die anderen Wetterstationen angewandt, für die die Daten in täglicher Auflösung vorliegen.

Wetterstation (Kennung)	verfügbare Daten (Jahr:Monate)
Point Barrow (BAR)	92;93;94:2-12;95;96:1-11;97:2-12;98;99:1-11;00:2-12;01:2-12;02;03
Jokoinen (029630)	64-77;78:1-5,7-12;79-93
Fairbanks (702610)	64:1-11;65:2-7,9-12;66:2-12;64:1-7,9-12;67;68;69:1,2,4-12;70;71;72:1,3-12;73;74;75:1-9,11;76;77:4,6-8,12;78:3-8;79:4,5,8,11;80:2,11,12
Burlington (726170)	64;65:1-10;67:9-12;68;69:1-8,12;70-72;73:2-7;76:3-6;77;78:1-6,9-11;79:2-12;80:1-4;88:1-4,6;93:1-7
Nashville/Metropolitan (723270)	64:4-12;65-76;77:5-12;78-79;80:1-6;88:1-11;89:1-9,12;90:1-10,12;91:1-6;93
Kassel (104380)	80-91;92:1-7;93
Tiszaors (128821)	64-65
Wajima (476000)	72-91;92:1-6,10-12;93
Dodge City (724510)	64:1,2,4-12;65;66:1-11;67-70;71:1-6;72-78;79:1,2,4-12;80:1-5,7-9,11,12;88:9,10;89:2,5;90:3,4
Athens Obs. (167140)	64-85
Louga (616121)	80;81:1-3,9-12;82;83:1-6;84:9-12;85;86:1,5,6,8;88:6,8-12;89;90;91:1-5,7,8,11,12
Ahmadabad (426470)	64-68;69:1-4,6-12;70-74;75:1-11;76:2-12;77-83;84:1-6,11,12;85:2-12;86-90;91:1-7,9,10,12;93
Jodhpur (423390)	64;65;66:1-8,11,12;67:1,2;68:1,3,4,10-12;69:1-3,6-8,10;70:1,11;71:2-4,9;72:2-12;73:1-7,10-12;74;75:1-5,11;76:5-12;77:1-3,6,10-12;78:3,11,12;79:1,2,4,6,11,12;80:10;81:5,6,11;82:12;83:11;85:6,9-12;86:1-5,9-12;87;88;89:1-7,9-12;90:1-4,6,10-12;91:1,3-5,9-12;93:1-5,11-12
Lubumbashi/Karavia (643700)	65:9-12;66-75
Goa/Panjim (431920)	64;65:1-3;66:1,8-12;67:1-3,11;68:1,5,8-11;69:1,2,4-10;70:1-5,9-12;71:1-10,12;72:1-5,7,11,12;73:1-4,7,9-12;74:1-8,10-12;75;76:1-7,12;77:1-5,7-12;78-84;85:1-6,8-12;86:1-5,9-12;87;88:1-10;89;90;91:1-7,9-12;93:1-4,6-8,11,12
Pinang/Bayan Lepas (486010)	75-77;78:3,7-12;79:1,3-12;80;81:1-3,12;82:1-9,11,12;83;84:1-4,7-12;85:3-12;86-93
Kuala Lumpur/Subang (486470)	73:2-12;74-93
Raqqa (400390)	72:10-12;73:1-5,7-12;74:1-6,9-12;75:1-4,7-9;76:3-5,7-12;77:1,6,7,9
Desert Rock SURFRAD, PA (DRA)	98:3-12;99-01;02:1-5,7-12;03:1
Ely/Yelland (724860)	64;65;66:1-10;67;68;69:1-7,10-12;70;71:1-11;72:2-12;73:4-12;74-76;77:3-12;78:1-6,9-12;79;80:1;88:11;89:2,10,11;90:11;91:3;93:1-3,10

Die Messdaten der Globalstrahlung liegen in W m^{-2} vor, in CABIN werden jedoch Quantenflussdichten in $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ benötigt (siehe Gleichungen 2.8 und 2.9). Daher wurden die Daten unter den Annahmen, dass 44 % der Energie der Strahlung zur photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) gehören (Knorr, 1997) und 1 Watt der PAR $4,6 \mu\text{E s}^{-1}$ entsprechen (Campbell und Norman, 1998) umgerechnet.

Auch für die NPP-Station wurde die potentielle Strahlung I_{pot} nach der in Anhang C.1.5 beschriebenen Methode berechnet. Auf sie wird der zuvor für die Wetterstation bestimmte RF angewandt, um die im Photosynthesemodell zu verwendende PAR zu berechnen:

$$I_0 = I_{pot} \cdot RF \quad (\text{C.2})$$

I_{pot} ist die potentielle und I_0 die hergeleitete Strahlung an der NPP-Station (beide $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Diese Methode wurde entsprechend der zeitlichen Auflösung der verfügbaren Messdaten für BSRN-Daten auf stündlicher und für WRDC-Daten auf täglicher Ebene durchgeführt.

C.1.3 Jahresverlauf und Tagesgang für BSRN-Strahlungsdaten.

In CABIN sollen durchschnittliche repräsentative Wetterdaten verwendet werden (siehe ersten Absatz Abschnitt 3.3.4). Die von BSRN erhältlichen Strahlungsdaten liegen in Auflösungen von einer oder drei Minuten für jeweils mehrere Jahre zwischen 1993 und 2003 vor (siehe Tabelle C.1). Um aus diesen Daten einen repräsentativen Datensatz der stündlichen Strahlung zur Verwendung mit CABIN herzuleiten, reicht es nicht aus, für jeden Zeitpunkt des Jahres den Mittelwert über die erhältlichen Jahre zu bilden. Dies würde jegliche Strahlungsspitzen aus dem Datensatz eliminieren, was eine wenig realistische Repräsentation ergäbe.

In einem ersten Schritt wurde daher aus den zeitlich hoch aufgelösten Daten Stundenwerte hergeleitet, indem Stundenmittel gebildet wurden:

$$I(h) = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{m=1}^{\mathcal{N}} I(m) \quad (\text{C.3})$$

Hier steht $I(h)$ für die stündliche und $I(m)$ für die je nach Datenangebot minütliche oder dreiminütige Strahlung und \mathcal{N} für die Anzahl gültiger Datenpunkte der Stunde.

Anschließend wurden die 365 Tage des zu erstellenden Datensatzes durchgegangen. Mit Hilfe eines Zufallsgenerators (Press et al., 1992a) wurde für jeden Tag aus den Jahren, für die Messdaten zugänglich sind, ein Jahr ausgewählt. Aus diesem Jahr wurden die Stundenwerte für den jeweiligen Tag in den für CABIN zu erstellenden Datensatz eingesetzt:

$$I(d) = rand_{ann}(I(d, ann)) \quad (\text{C.4})$$

Hier steht $I(d)$ für die in CABIN verwendeten Strahlungsdaten des Tages d und $I(d, ann)$ für die Strahlungsdaten für den Tag d des Jahres ann . $rand_{ann}$ bezeichnet eine Zufallsfunktion, die aus den Jahren mit gültigen Daten für den Tag d eines auswählt. Der Tagesgang ergibt sich direkt aus den stündlichen Messdaten.

Auf Basis dieser Daten wurde, wie oben beschrieben, der Reduktionsfaktor RF berechnet und auf die potentielle Strahlung an der NPP-Station angewandt (Gleichungen C.1 und C.2).

C.1.4 Jahresverlauf und Tagesgang für WRDC-Strahlungsdaten.

An den Stationen, für die I'_0 von WRDC stammt, liegen die Strahlungsdaten für mehrere Jahre als Tagessummen vor (siehe Tabelle C.1). Von diesen Daten ausgehend wurde mit Hilfe des Zufallsgenerators analog Gleichung C.4 vorgegangen und für jeden Tag des zu erstellenden repräsentativen Jahresdatensatzes jeweils ein Jahr gewählt. Die Tagesstrahlung aus diesem Jahr wurde für den jeweiligen Tag verwendet, um nach Gleichung C.1 einen Reduktionsfaktor zu bestimmen. Die Reduktionsfaktoren wurden, wie in Gleichung C.2 beschrieben, auf die potentielle Strahlung an der NPP-Station angewandt.

Die so erhaltenen täglichen Strahlungssummen $I_0(d)$ müssen im nächsten Schritt auf die Stunden des Tages verteilt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Vorlagedatensatz verwendet. Dieser Datensatz stammt aus dem Surface Radiation Budget (SRB) Datensatz des International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP, Stackhouse et al., 2000, 2004). Die räumliche Auflösung des Vorlagedatensatzes ist ein globales Gitter von einem Grad geographischer Länge mal Breite. Jeder NPP-Station wurden die Daten desjenigen Gitterelementes zugewiesen, in dem die Station liegt. Für jeden Monat ist im Vorlagedatensatz für einen durchschnittlichen Tag die Strahlung in dreistündiger Auflösung angegeben. Die Daten liegen für die Jahre 1986 bis 1995 vor. Die durchschnittlichen Monatstagesgänge wurden über diese Jahre gemittelt, um eine langfristiges Mittel des monatlichen Tagesgangs zu bestimmen:

$$I_V(mon, h) = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{ann=1986}^{1995} I_V(ann, mon, h) \quad (C.5)$$

wobei $I_V(mon, h)$ für die im Monat mon durchschnittliche Strahlung der Stunde h im Vorlagedatensatz und $I_V(ann, mon, h)$ für die im Monat mon des Jahres ann herrschende Strahlung der Stunde h im Vorlagedatensatz steht. \mathcal{N} bezeichnet die Anzahl Jahre, für die für die Stunde h des Monats mon gültige Daten vorliegen.

Unter der Annahme, dass der langfristige mittlere monatliche Tagesgang für die Mitte eines Monats gilt, wurde für jeden der acht dreistündigen Werte zwischen den Monatsmitten aufeinander folgender Monate interpoliert, so dass für jeden Tag des Jahres acht Datenpunkte vorliegen. Zur Interpolation wurde ein kubischer Spline verwendet, der mit einer linearen Interpolation gemittelt wurde, um übermäßige Schwingungen des Splines zu glätten.

Im nächsten Schritt wurden die fehlenden Stundenwerte für jeden Tag des Jahres durch lineare Interpolation zwischen den acht dreistündigen Datenpunkten erzeugt. Dabei wurde angenommen, dass jeder dreistündige Wert für die mittlere Stunde des dreistündigen Zeitraums gilt. Auf diese Weise wurden stündliche Strahlungswerte $I_V(d, h)$ für jede Stunde h jedes Tages d des Vorlagedatensatzes erzeugt.

Um den Tagesgang aus diesen Vorlagedaten auf die an den WRDC-Stationen gemessenen Tagessummen der Strahlung zu übertragen, wurde jeder Stunde h jedes Tages d des zu erstellenden repräsentativen Datensatzes der Anteil an der gemessenen Tagesstrahlungssumme zugeteilt, der auch im Vorlagedatensatz auf die jeweilige Stunde entfällt. Die stündliche Strahlung an der NPP-Station $I_0(d, h)$ berechnet sich demnach wie folgt:

$$I_0(d, h) = I_0(d) \frac{I_V(d, h)}{\sum_{h=1}^{24} I_V(d, h)} \quad (C.6)$$

C.1.5 Berechnen der potentiellen Strahlung

Die potentielle Strahlung I_{pot} ist die physikalisch an einer geographischen Position mögliche Strahlung. Sie wird durch die relative Position der Sonne bestimmt und ist daher abhängig von Tages- und Jahreszeit.

C.1.5.1 Strahlung über der Atmosphäre

Zuerst muss der Strahlungsfluss über der Atmosphäre I_{OA} durch eine gedachte Ebene parallel zur Erdoberfläche nach dem Lambert'schen Kosinusetz berechnet werden (Knorr, 1997):

$$I_{OA} = S_0 \cdot r_{\odot}^{-2} \cdot \cos(\Phi) \quad (C.7)$$

r_{\odot}^{-2} ist der inverse quadrierte Abstand von der Sonne. Es handelt sich um einen skalaren Wert, der bei mittlerem Abstand von der Sonne den Wert 1 annimmt. Dieser Wert skaliert S_0 , die Solarkonstante, die für den mittleren Sonnenabstand mit 1360 W m^{-2} angenommen wird. Φ ist der Winkel zwischen dem Zenit und der Position der Sonne. r_{\odot}^{-2} (im Bogenmaß) wird nach Spencer (1971) berechnet:

$$r_{\odot}^{-2} = 1,00011 + 0,034221 \cos(\alpha_0) + 0,00128 \sin(\alpha_0) + 0,000179 \cos(\alpha_0) + 0,000077 \sin(2\alpha_0) \quad (C.8)$$

α_0 steht hier für den Tageswinkel der Sonne, wobei das Jahr als ein voller Kreis interpretiert wird:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{365} \cdot (d - 1) \quad (C.9)$$

d ist der Tag im Jahr (Julian Day). Das Jahr wird immer mit 365 Tagen angenommen; Schalttage werden ignoriert.

Φ ergibt sich aus

$$\cos(\Phi) = \sin(lat) \sin(\delta) + \cos(lat) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (C.10)$$

mit lat als geographische Breite und δ als Deklination der Sonne. ω ist der Stundenwinkel, der auch als Bruchteil des Tages interpretiert werden kann und nach $\omega = \pi \cdot h/12$ bestimmt wird. h steht hier für die Stunde des Tages. Die Deklination der Sonne δ wird nach Spencer (1971) wie folgt berechnet:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos(\gamma) + 0,070257 \sin(\gamma) - 0,006758 \cos(2\gamma) + 0,000907 \sin(2\gamma) + 0,00148 \sin(3\gamma) \quad (C.11)$$

γ ist der bis zur aktuellen Stunde vergangene Bruchteil eines Jahres:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \cdot \left(d - 1 + \frac{h - 12}{24} \right) \quad (C.12)$$

C.1.5.2 Potentielle Strahlung an der Oberfläche

Der Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre und die damit einhergehende Abschwächung wird nach dem Modell von Hottel (1976) bestimmt. Dieses Modell ist an ein detailliertes atmosphärisches Transmissionsmodell empirisch angepasst. Es bestimmt Durchlässigkeiten getrennt nach direkter und diffuser Strahlung, was die Erweiterbarkeit des Photosynthesemodells von CABIN unterstützt.

Zunächst wird die Durchlässigkeit der Atmosphäre für direkte Strahlung τ_b berechnet:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{(-k/\cos(\Phi))} \quad (\text{C.13})$$

Die Parameter dieser empirischen Funktion berechnen sich aus der Höhe über dem Meeresspiegel H (km):

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821 \cdot (6,0 - H)^2 \quad (\text{C.14})$$

$$a_1 = 0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - H)^2 \quad (\text{C.15})$$

$$k = 0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - H)^2 \quad (\text{C.16})$$

Die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die gesamte Strahlung τ wird von der Durchlässigkeit für direkte Strahlung τ_b abgeleitet (Weiss und Norman, 1985):

$$\tau = 0,4 + 0,6 \cdot \tau_b \quad (\text{C.17})$$

Die potentielle für die Photosynthese nutzbare Strahlung I_{pot} wird in der Einheit $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ benötigt. Die Umrechnung der einfallenden Strahlung I_0 geschieht unter der Annahme, dass 44 % der Energie der Globalstrahlung photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) sind (Knorr, 1997) und 1 W m^{-2} der PAR $4,6 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ entsprechen (Campbell und Norman, 1998):

$$I_{pot} = 0,44 \cdot \tau \cdot I_{OA} \cdot 4,6 \quad (\text{C.18})$$

C.2 Herleitung der Niederschlagsdaten

Die stündlichen Niederschlagsdaten wurden aus an Wetterstationen gemessenen Tagesniederschlagssummen hergeleitet. Es wurde angenommen, dass die Niederschläge an den NPP-Stationen denen an den Wetterstationen gleichen (siehe Abschnitt 3.3.4.2).

C.2.1 Quelle der Messdaten

Die gemessenen Niederschlagssummen für die meisten NPP-Stationen stammen aus einer Datensammlung, die vom Agricultural Research Service des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums erhältlich ist (<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=9709&page=1>, Stand 17.04.2006). Darin enthaltene Daten aus den USA stammen vom US-amerikanischen National Weather Service, Daten von Stationen außerhalb der USA wurden von Global Data Systems zusammengestellt. Der Datensatz wird hier als ‚GDS‘ bezeichnet. Die Daten liegen als tägliche Niederschlagssummen vor. Die Quellen anderer verwendeter Daten und die Zuordnung der Wetterstationen zu den NPP-Stationen finden sich in Tabelle 3.5 auf Seite 47.

C.2.2 Zeitlicher Verlauf

Zur Erstellung des repräsentativen Niederschlagsdatensatzes wurden gemessene Tagessummen aller erhältlichen Jahre (siehe Tabelle C.2) gemittelt. Die Erhaltung der Extrema ist hier im Gegensatz zur Situation bei der Strahlung (Abschnitt C.1) nicht von Bedeutung, da die Niederschläge nur in die Bodenwasserberechnungen eingehen und dort ein langfristiger laufender Mittelwert berechnet wird (siehe Abschnitt 2.2.1

Tabelle C.2: Verfügbarkeit von Messdaten an den zur Herleitung der Niederschlagsdaten verwendeten Wetterstationen. Angegeben sind die Jahre, für die Daten zur Verfügung stehen. Bei Jahren mit unvollständigen Daten sind die Monate mit vorhandenen Daten angegeben. Die Angaben zur Verfügbarkeit wurden unter dem Kriterium erstellt, dass ein verfügbarer Monat für mindestens die Hälfte der Tage gültige Daten vorweisen muss. Für einige Stationen sind nur langfristige Durchschnittswerte für die Niederschläge verfügbar.

Wetterstation (Kennung)	verfügbare Daten (Jahr:Monate)
Umiat (509539)	langfristiger Durchschnitt
Kuorevesi (02945)	77:10-12;79-91
Fairbanks WSFO AP AK (142968)	49:9-12;50:1-10;52-92
Plymouth 2 (276945)	51:6-12;52-54;55:3,4,6-12;56-63;64:1-10,12; 65-73;74:1-6,9-12;75-92
Franklin (403280)	28-51;52:1-9,12;53;54;55:2-12;56;57;58:1-4, 7-12;59-82;83:1-7,9-12;84:1-9,11,12;85-92
Solling_1379	langfristiger Durchschnitt
Solling_1377	langfristiger Durchschnitt
Miskolc (12772)	77:10-12;79-91
Niigata (47604)	77:10-12;79-91
Hays 1 S KS (143527)	13:2-12;14-73;74:1-5,7-12;75-84;85:1-5,7-12; 86-88;89:1,3-12;90-92
Athenai/Hellenikon (16716)	77:10-12;79-91
Louga (61600)	51-57;58:1-3,10-12;59:1,2;60:7-9;61:1-10;62: 7;63:2-12;64-67;68:2-12;69-74;75:1-11;76;77: 1-10;78:1-6,8-11;79;80:1-10;81
Ahmedabad (42647)	77:10-12;79-91
Jodhpur (42339)	langfristiger Durchschnitt
Lubumbashi (64360)	langfristiger Durchschnitt
Mangalore/Bajpe (43284)	77:10-12;79-91
Trang (48567)	77:10-12;79-91
Pasoh	langfristiger Durchschnitt
Abu Kamal (40072)	77:10-12;78:1-4,6,8-12;79:4,5,8-12;80;81:1,3- 12;82-86;87:1-3,6-12;88-91
Desert Rock WMSO (262251)	langfristiger Durchschnitt
Lucin UT (425239)	48:7-10;49-54;55:1,2;82:4-12;83-90

und Gleichung 2.2). Nichtsdestotrotz werden stündliche Werte benötigt, um zu jedem Zeitschritt von CABIN Gleichung 2.1 berechnen zu können.

Um die Tagesniederschläge auf die Stunden des Tages zu verteilen, wurden Tagesgänge des Niederschlags aus dem ISLSCP (siehe Abschnitt C.1) als Vorlage verwendet. Sie liegen für Niederschläge in dreistündiger Auflösung täglich für die Jahre 1986 bis 1995 in einem globalen 1-Grad-Gitter (geographische Breite \times Länge) vor. Jeder NPP-Station wurden die Daten desjenigen Gitterelementes zugewiesen, in dem die Station liegt. Als Vorlage für den Tagesgang wurden für jeden Tag des Jahres Mittelwerte über die vorliegenden Jahre gebildet:

$$P(h) = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{ann=1986}^{1995} P(ann, h) \quad (\text{C.19})$$

Hier steht $P(h)$ für den mittleren Niederschlag der jeweiligen Stunde h und $P(ann, h)$ für den Niederschlag der Stunde im Jahr ann . \mathcal{N} bezeichnet die Anzahl Jahre, für die für die Stunde h gültige Werte vorliegen.

Der so entstandene Vorlagedatensatz der durchschnittlichen Niederschläge in dreistündiger Auflösung muss in eine Auflösung von einer Stunde zu überführt werden. Zu diesem Zweck wurde zwischen den gegebenen Mittelwerten der dreistündigen Zeiträume so interpoliert, dass der Mittelwert der dabei entstehenden Werte der drei einzelnen Stunden den gegebenen dreistündigen Mittelwert reproduziert (Methodenbeschreibung siehe Anhang C.2.4).

Im nächsten Schritt müssen die so erhaltenen Vorlagetagesgänge auf die wie oben beschrieben hergeleiteten mittleren Tagessummen des Messdatensatzes übertragen werden. Es wurde dazu im Vorlagedatensatz der relative Anteil des Niederschlags einer Stunde am Tagesniederschlag bestimmt und auf die mittleren gemessenen Tagessummen übertragen:

$$P(d, h) = P(d) \frac{P_V(d, h)}{\sum_{h=1}^{24} P_V(d, h)} \quad (\text{C.20})$$

Hier bezeichnet $P_V(d, h)$ den Niederschlag der Stunde h des Tages d im Vorlagedatensatz, $P(d)$ die mittlere Tagessumme aus dem Messdatensatz und $P(d, h)$ für den Niederschlag der jeweiligen Stunde an der NPP-Station.

Traten im Vorlagedatensatz ganze Tage mit einem Niederschlag von null auf, während an der Wetterstation Niederschläge für den entsprechenden Tag angegeben waren, so wurden aus dem Vorlagedatensatz Werte des letzten vorhergehenden Tages mit Niederschlag verwendet, um die Tagessumme auf die Stunden zu verteilen.

C.2.3 Ausnahmen

Ausnahmen bilden die Stationen 23, 65, 66, 271, 105 und 106. Für diese existieren keine geeigneten Wetterstationen mit täglichen Niederschlagsangaben (siehe Tabelle 3.5). Daher wurden hier monatliche Daten verwendet. Die Verteilung der Monatssummen P_{mon} auf die Stunden h des Monats mon wurde analog zur Vorgehensweise bei Tagessummen durch die Berechnung relativer Niederschlagsanteile der jeweiligen Stunde an der Niederschlagssumme des Monats im Vorlagedatensatz erreicht:

$$P(d, h) = P(mon) \frac{P_V(d, h)}{\sum_{d=1}^{\mathcal{N}} \sum_{h=1}^{24} P_V(d, h)} \quad (\text{C.21})$$

C.2.4 Interpolation der Niederschlagsdaten

Zur Erzeugung der stündlichen Niederschlagsdaten wurden an einer Wetterstation gemessene Tagessummen des Niederschlags anhand von modellierten Daten auf die Stunden eines Tages verteilt (siehe Abschnitt C.2). Da die modellierten Niederschlagsdaten als Stundenmittel über dreistündige Intervalle angegeben sind, müssen sie auf stündliche Werte interpoliert werden. Dabei sollen die angegebenen Mittelwerte wo möglich erhalten bleiben.

Die gegebenen Dreistundenintervalle werden nacheinander bearbeitet. Für jedes dieser Intervalle sei P'_h der zu berechnende Niederschlag für die mittlere Stunde. Entsprechend seien P'_{h-1} und P'_{h+1} die Werte für die erste und dritte Stunde (Abbildung C.1). P'_{h-1} wird durch lineare Interpolation zwischen dem noch unbekanntem Punkt P'_h und dem Mittelwert des vorhergehenden dreistündigen Intervalls P_{h-3} berechnet:

$$P'_{h-1} = \frac{1}{3}P_{h-3} + \frac{2}{3}P'_h \quad (\text{C.22})$$

Analog wird mit P'_{h+1} verfahren:

$$P'_{h+1} = \frac{1}{3}P_{h+3} + \frac{2}{3}P'_h \quad (\text{C.23})$$

Für das mittlere dreistündige Intervall gilt:

$$P_h = \frac{P'_{h-1} + P'_h + P'_{h+1}}{3} \quad (\text{C.24})$$

Nun werden die Gleichungen C.22 und C.23 in Gleichung C.24 eingesetzt und nach dem bisher unbekanntem Punkt aufgelöst:

$$P'_h = \frac{3}{7}(3P_h - \frac{1}{3}P_{h-3} - \frac{1}{3}P_{h+3}) \quad (\text{C.25})$$

Abschließend können die Punkte P'_{h-1} und P'_{h+1} anhand der Gleichungen C.22 und C.23 berechnet werden.

Ergibt sich für einen der berechneten Punkte ein negativer Wert, wird auf die Interpolation verzichtet. In dem Fall werden alle drei Stundenwerte eines dreistündigen Intervalls auf den Mittelwert P_h gesetzt.

C.3 Herleitung der Temperaturdaten

C.3.1 Quelle der Messdaten

Stündliche Temperaturdaten wurden aus gemessenen Tagesminimums- und -maximumtemperaturen hergeleitet. Die entsprechenden Messdaten entstammen dem GDS-Datensatz (siehe Abschnitt C.2). Die Zuordnung der Wetterstationen zu den NPP-Stationen sind in Tabelle 3.6 auf Seite 49 dargestellt. Dort finden sich auch Informationen zu den Datenquellen für diejenigen Stationen, für die andere Datenquellen herangezogen werden mussten.

Die täglichen Temperaturextrema wurden über die Jahre mit gültigen Daten gemittelt.

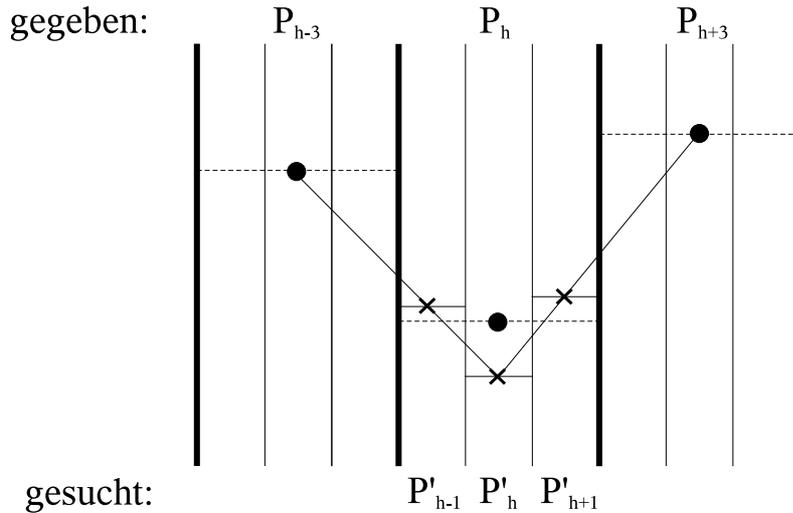


Abbildung C.1: Schematische Darstellung der Methode der Interpolation unter Erhaltung der Mittelwerte. Symbole: \bullet , P – gegebener Mittelwert eines dreistündigen Intervalls; \times , P' – zu berechnende stündliche Werte.

C.3.2 Zeitlicher Verlauf

Zur Herleitung stündlicher Temperaturwerte aus den gemessenen Minima und Maxima wurden Tagesgänge aus Daten des ISLSCP (siehe Abschnitt C.1) als Vorlage verwendet. Sie existieren für Temperaturen täglich in dreistündiger Auflösung in einem globalen 1-Grad-Gitter (geographische Breite \times Länge). Jeder NPP-Station wurden die Daten desjenigen Gitterelementes zugewiesen, in dem die Station liegt. Die Vorlagedaten liegen für die Jahre 1986 bis 1995 vor. Als Vorlage für den Tagesgang an den Wetterstationen wurden für jede Tag des Jahres Mittelwerte über diese Jahre gebildet. Die nicht im Vorlagedatensatz enthaltene Stundenwerte wurden durch lineare Interpolation ergänzt. Dabei wurde angenommen, dass die jeweils angegebene Temperatur für die Mitte des dreistündigen Zeitraums gilt.

Im nächsten Schritt wurde für jeden Tag aus dem Vorlagedatensatz die Minimums- ($T_{V,min}$) und Maximumtemperatur ($T_{V,max}$) bestimmt. Diese bilden die Tagestemperaturspanne eines Tages. Die Temperaturen der Stunden des Tages wurden als relative Temperaturen T_{rel} dargestellt. Dazu wurde die Spanne zwischen der Temperatur der jeweiligen Stunde und der Minimumtemperatur des Tages mit der Tagestemperaturspanne in Beziehung gesetzt:

$$T_{rel}(h) = \frac{T_V(h) - T_{V,min}}{T_{V,max} - T_{V,min}} \quad (C.26)$$

$T_V(h)$ steht hier für die Temperatur der Stunde h des aktuellen Tages im Vorlagedatensatz.

Um die relativen Temperaturen auf die an der Wetterstation gemessenen Temperaturextrema anwenden zu können, muss auch dort eine tägliche Temperaturspanne bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturextrema für jeden Tag über diejenigen Jahre gemittelt, für die gültige Messdaten zugänglich sind (siehe Tabelle C.3).

Die nach Gleichung C.26 bestimmte relative Temperatur kann nun auf die Tagestemperaturspanne zwischen den gemittelten Tagesminimums- (T_{min}) und Ma-

Tabelle C.3: Verfügbarkeit von Messdaten an den zur Herleitung der Temperaturdaten verwendeten Wetterstationen. Angegeben sind die Jahre, für die Daten zur Verfügung stehen. Bei Jahren mit unvollständigen Daten sind die Monate mit vorhandenen Daten angegeben. Die Angaben zur Verfügbarkeit wurden unter dem Kriterium erstellt, dass ein verfügbarer Monat für mindestens die Hälfte der Tage gültige Daten vorweisen muss. Für einige Stationen sind nur langfristige Durchschnittswerte für die Temperaturen verfügbar.

Wetterstation (Kennung)	verfügbare Daten (Jahr:Monate)
Umiat (509539)	langfristiger Durchschnitt
Kuorevesi (02945)	77:10-12;78-91
Fairbanks WSFO AP AK (142968)	49:9-12;50:1-9;51-92
Plymouth 2 (276945)	51:6-12;52;53:1-6,8-12;54;55:6-12;56-58;59: 1-11;60-63;64:1-3,12;65-72;73:1-6,8-12;74:1- 6,9-12;75-92
Franklin (403280)	28-51;52:1-9,12;53:1-6,8,10-12;54:1-3,5-12; 55:2-12;56:1-11;57;58:1-4,10-12;59:1-6,8-12; 60:1-5,7-12;61:1-7,9-12;62-64;65:1-8,10-12; 66-78;79:1-6,8-12;80-82;83:1-7,9-12;84:1-9, 11,12;85-92
Solling_1379	langfristiger Durchschnitt
Solling_1377	langfristiger Durchschnitt
Miskolc (12772)	77:10-12;78-91
Niigata (47604)	77:10-12;78-91
Hays 1 S KS (143527)	13-17;18:2-12;19-73;74:1-5,7-12;75-84;85:1- 5,7-12;86-88;89:1,3-12;90-92
Athenai/Hellenikon (16716)	77:10-12;78-91
Rosso (61600)	77:10-12;78-82;83:2-4,6-12;84:1-10,12;85:1- 5,7-9,12;86:1-10,12;87-91
Ahmedabad (42647)	77:10-12;78-91
Jodhpur (42339)	77:10-12;78;79:1-6,8-12;80-82;83:1-6,9-12; 84:1-4,6-8,10-12;85;86;87:1-10;88:1,2,7-12; 89;90:1,2,5-8,10-12;90:6-12
Lubumbashi (64360)	langfristiger Durchschnitt
Mangalore/Bajpe (43284)	77:10-12;78-91
Trang (48567)	77:10-12;78-91
Malacca	langfristiger Durchschnitt
Abu Kamal (40072)	77:10-12;78:1-4,6,8-10;79:4,5,8,11;80:4-6,9- 12;81:3,5,6,8-12;82:1-5,7-12;83:1-11;84-86; 87:1-3,6-12;88:1,3-12;89;90:1-8,10-12;91
Desert Rock WMSO (262251)	langfristiger Durchschnitt
Lucin UT (425239)	48:7-12;49-53;54:1-10,12;55:1,2;82:6-12;83- 90

ximumstemperaturen (T_{max}) angewandt werden. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe der relativen Temperatur der Anteil an der gemessenen Tagestemperaturspanne bestimmt, der zur Tagesminimumtemperatur addiert werden muss, um die Temperatur der aktuellen Stunde zu bestimmen:

$$T(h) = T_{rel}(h) \cdot (T_{max} - T_{min}) + T_{V,min} \quad (C.27)$$

Hier steht $T(h)$ für die mit CABIN verwendete Temperatur der aktuellen Stunde.

C.3.3 Ausnahmen

Ausnahmen bilden die Stationen 65, 66, 1377 und 1379. Für diese existieren keine geeigneten Wetterstationen mit täglichen Temperaturextrema. Daher wurden hier monatliche Daten der Minimums- und Maximumtemperatur verwendet (Quellen siehe Tabelle 3.6).

Unter der Annahme, dass die für einen Monat angegebenen Werte für die Mitte des jeweiligen Monats gelten, wurde zwischen den Monatsmitten interpoliert, um tägliche Minima und Maxima der Temperatur zu erhalten. Hier wurde analog zu Abschnitt C.1 (Teil „Jahresverlauf und Tagesgang für WRDC-Strahlungsdaten“) vorgegangen.

Aus den so erhaltenen Tagesextrema der Temperatur wurden wie oben beschrieben die Stundenwerte hergeleitet.

C.3.4 Höhenkorrektur

Aus den hergeleiteten Temperaturdaten wurden die mittleren Jahrestemperaturen berechnet. Diese wurden zur Plausibilitätsprüfung mit entsprechenden Angaben aus der Literatur verglichen. Hierbei wurden die Differenzen zwischen diesen Werten betrachtet. Lag die Differenz über 1°C , so wurde für diese NPP-Station eine Höhenkorrektur der Temperaturdaten vorgenommen.

Zur Höhenkorrektur wurden die generierten Temperaturdaten modifiziert, indem ein vom Höhenunterschied zwischen der Wetter- und der NPP-Station abhängiger Temperatur-Offset addiert wurde. Der Offset wurde unter der Annahme berechnet, dass die Temperatur mit einer Höhenzunahme von 1000 Meter um $6,3^\circ\text{C}$ sinkt:

$$T_{hkorrr} = T + \frac{\Delta elev}{1000} \cdot 6,3 \quad (C.28)$$

Hier bezeichnet T_{hkorrr} die höhenkorrigierte Temperatur, T die Temperatur ohne Höhenkorrektur und $\Delta elev$ den Höhenunterschied in Metern zwischen der Wetter- und der NPP-Station.

Als Quelle der Vergleichsdaten wurden wo möglich Daten aus der Primärliteratur über die NPP-Stationen verwendet (siehe Abschnitt 3.2). Für einige Stationen enthält die vorliegende Primärliteratur keinerlei Angaben über die Temperaturen. In solchen Fällen wurde versucht, aus dritten Quellen Vergleichswerte zu bekommen. War auch dies nicht möglich, wurde unabhängig vom Höhenunterschied zwischen Wetter- und NPP-Station auf eine Höhenkorrektur verzichtet.

In Tabelle C.4 sind die verglichenen Temperaturdaten und die gefundenen Unterschiede zusammen mit den Informationen zu abweichenden Datenquellen dargestellt. Nur für die boreale Station 1567, die Station 773 im temperierten Wald, die Savannenstation 164 und die Doppelstation 65/66 im tropischen Regenwald ergaben sich

für die mittlere Jahrestemperatur zwischen Angaben zu NPP-Station und den generierten Temperaturdaten Differenzen von mehr als 1°C. Nur bei ihnen wurde eine Höhenkorrektur der generierten Temperaturen vorgenommen.

C.3.5 Schwierigkeiten

Durch die Art der Bestimmung der stündlichen Temperaturen kann es am Übergang zwischen zwei Tagen zu einem Temperatursprung kommen. Dieser ist nicht realistisch, kann aber, da er bei Nacht stattfindet, weitgehend vernachlässigt werden. Eine deutliche Auswirkung ist auch aufgrund der minütlichen Interpolation der Temperaturen in CABIN nicht zu erwarten.

Tabelle C.4: Vergleich von wie in Abschnitt C.3 beschrieben hergeleiteten und der Primärliteratur (oder weiteren dritten Datenquellen) entnommenen Temperaturdaten zur Entscheidung über die Notwendigkeit einer Höhenkorrektur der hergeleiteten Temperatur. Wo erhältlich, wird auf Basis der mittleren Jahrestemperatur (\bar{T}_{ann}) verglichen. Im Falle zweier Stationen läuft der Vergleich auf Ebene von mittleren Monatstemperaturen. Angegeben sind die Höhen über NN der NPP- und der Wetterstation, der Höhenunterschied, die hergeleitete und auf Messdaten basierende Temperatur und die Abweichung der Temperaturen. Eine Höhenkorrektur der Temperatur wurde ab einer Temperaturdifferenz von 1°C durchgeführt. Das Symbol – bezeichnet fehlende Werte. Vegetationstypen: Tu – Tundra; Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald; Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste.

NPP-Station (Vegetation)	Höhe über NN (m)		Temperatur (°C)			Differenz		Hinweis
	NPP-Station	Wetterstation	Art	hergeleitet	Literaturwert	Höhe (m)	Temperatur (°C)	
1594 (Tu)	196	88	\bar{T}_{ann}	-11,9	–	108	–	(1)
1552 (Bo)	103	143	\bar{T}_{ann}	3,3	2,9	40	0,4	
1556 (Bo)	111	143	\bar{T}_{ann}	3,3	–	32	–	(2)
1567 (Bo)	150	44	\bar{T}_{ann}	-2,1	-3,4	106	1,3	(3)
1009 (Te)	550	201	Jan	-8,5	-9,0	349	0,5	
			Jul	18,8	17,5		1,3	
991 (Te)	550	201	Jan	-9,0	-9,0	349	0,5	
			Jul	19,0	17,5		1,3	
709 (Te)	217	200	\bar{T}_{ann}	14,0	13,9 ^a	17	0,1	
1379 (Te)	292	292	\bar{T}_{ann}	6,3	6,5	0	0,2	
1377 (Te)	292	355	\bar{T}_{ann}	7,6	–	63	–	(4)
1184 (Te)	171	233	\bar{T}_{ann}	9,1	9,9	62	0,8	
773 (Te)	227	2	\bar{T}_{ann}	13,8	9,3-10,4	225	3,7-4,5	(3)
808 (St)	621	200	\bar{T}_{ann}	11,4	–	421	–	(5)
779 (Me)	209	9	\bar{T}_{ann}	17,9	18,2	200	0,3	
105 (Sa)	55	38	\bar{T}_{ann}	28,1	27,9 ^b	17	0,2	
106 (Sa)	55	38	\bar{T}_{ann}	28,1	27,9 ^b	17	0,2	
164 (Sa)	806	55	\bar{T}_{ann}	27,0	24,1 ^c	751	2,9	(3)
271 (Sa)	221	238	\bar{T}_{ann}	26,3	26,8 ^d	17	0,5	
23 (DF)	1208	1290	\bar{T}_{ann}	20,0	20,3 ^e	82	0,3	
56 (Tr)	200	90	\bar{T}_{ann}	26,7	27,0	110	0,3	
80 (Tr)	206	14	\bar{T}_{ann}	27,1	26,5-27,5	192	0,4-0,6	
66 (Tr)	188	45	\bar{T}_{ann}	26,5	25,0	143	1,5	(3)
65 (Tr)	188	45	\bar{T}_{ann}	26,5	25,0	143	1,5	(3)
634 (Dr)	222	180	\bar{T}_{ann}	20,1	20,1 ^f	42	0,0	
737 (Dr)	1239	1006	\bar{T}_{ann}	16,8	16,6 ^g	233	0,2	
885 (Dr)	1416	447	\bar{T}_{ann}	8,8	–	969	–	

(a) von <http://cirrus.dnr.state.sc.us/cgi-bin/sercc/cliMAIN.pl?tn3280>

(b) mittlere Jahrestemperatur aus dem Jahr der NPP-Bestimmung 1976

(c) aus der ORNL NPP-Datenbank (siehe Abschnitt 3.2)

(d) aus Klimadiagramm-Weltatlas (Walter und Lieth, 1960)

(e) aus IBP Woodland Dataset (Reichle, 1981)

(f) von <http://www.klimadiagramme.de> (selbe Wetterstation wie hier verwendet, jedoch auf aktuelleren Daten basierend)

(g) von <http://www.wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMAIN.pl?nvdesr>

Hinweise:

- (1) NPP- und Wetterstation gleichnamig
- (2) keine Temperaturangabe in der Primärliteratur. Station liegt nahe bei Station 156
- (3) Höhenkorrektur notwendig!
- (4) keine Temperaturangabe in der Primärliteratur. Station direkt bei Station 1379.
- (5) keine Temperaturangabe in der Primärliteratur.

C.4 Prüfung der Wetterdaten

In diesem Abschnitt werden Graphen und Tabellen zur Evaluierung der generierten Wetterdaten gezeigt. Den generierten Daten werden jeweils monatliche Vergleichsdaten von Messstationen und Daten aus dem globalen Datensatz des mittleren monatlichen Klimas von Leemans und Cramer (1991) gegenübergestellt.

In den Abbildungen C.4.2 bis C.4.2 ist jeweils der Niederschlag, die stündliche und tägliche Strahlung und die Temperatur zusammen mit den gemessenen Daten dargestellt.

In den Tabellen C.4.2 bis C.4.2 sind Vergleiche zwischen den generierten Wetterdaten, den dabei zugrunde gelegenen Daten von Wetterstationen und weiteren Vergleichsdaten mit monatlicher Zeitauflösung dargestellt.

C.4.1 Aufbereitung der generierten Daten zu Prüfung

Strahlung. Die generierten Strahlungsdaten wurden zur Prüfung monatlich aggregiert. Sie werden hier mit monatlich aggregierten Daten der als Datengrundlage verwendeten Wetterstationen (Tabelle 3.4) verglichen. Wo existent werden zusätzlich monatliche Strahlungsdaten aus Müller (1982) angegeben

Temperatur. Die generierten Temperaturdaten wurden zur Prüfung monatlich gemittelt. Es wurden zwei Arten von Monatsmitteln erzeugt: Mittlere monatliche Temperaturen als Mittel aller Stundenwerte und ebensolche als Mittel der Tagesminimums- und -maximumtemperaturen. Letztere dienen zum Vergleich mit den Daten der zur Generierung der Temperaturdaten verwendeten Stationen (Angabe in den Tabellen mit Stationsnummer/-bezeichnung), für die die Monatsmittel ebenso berechnet wurden. Erstere dienen dem Vergleich mit monatlichen Angaben von Müller (1982) und Leemans und Cramer (1991). Wo vorhanden, sind zusätzlich Daten aus der Primärliteratur zu den NPP-Stationen gezeigt.

Niederschlag. Die generierten Niederschlagsdaten wurden zur Evaluierung monatlich aufsummiert. Sie werden hier mit Monatssummen der zu ihrer Erzeugung herangezogenen Wetterstationsdaten (Angabe in den Tabellen mit Stationsnummer/-bezeichnung) verglichen. Wo vorhanden, werden zusätzlich monatliche Daten von Müller (1982), Daten von Leemans und Cramer (1991) und Angaben aus der Primärliteratur zu den NPP-Stationen gezeigt.

Ausnahmen. Bei NPP-Stationen, deren generierte stündliche Wetterdaten auf monatlichen Angaben basieren, sind keine weiteren monatlichen Vergleichsdaten von Klimastationen angegeben. Neben den monatlichen sind auch jährliche Summen und Mittelwerte aufgeführt.

C.4.2 Beurteilung der generierten Wetterdaten

Bei der Beurteilung der generierten Wetterdaten ist zu beachten, dass die zum Vergleich herangezogenen monatlichen Klimadaten teilweise von recht weit von der NPP-Station entfernten Orten stammen. Bei den Strahlungsdaten ergeben sich Abweichungen von den zu ihrer Generierung verwendeten Messdaten durch die angewandte Methode (siehe Abschnitt C.1). Bei den Temperaturdaten ergeben sich bei

einigen Stationen Unterschiede durch die Höhenkorrektur (siehe Abschnitt C.3.4). Basieren die generierten Wetterdaten auf monatlichen Ausgangswerten, ergeben sich Abweichungen in den Summen oder Mittelwerten durch die Interpolation auf tägliche Zeitauflösung. Bei den Vergleichen mit Angaben aus der Primärliteratur zu den NPP-Stationen ist zu berücksichtigen, dass sich diese oft auf nur kurze Zeiträume beziehen, die nicht unbedingt den Zeitpunkt der NPP-Messung umfassen.

Anhand der Abbildungen und Tabellen lässt sich erkennen, dass die generierten Wetterdaten im Bereich der Messdaten liegen. Sie können somit als repräsentativ für die NPP-Stationen angenommen werden.

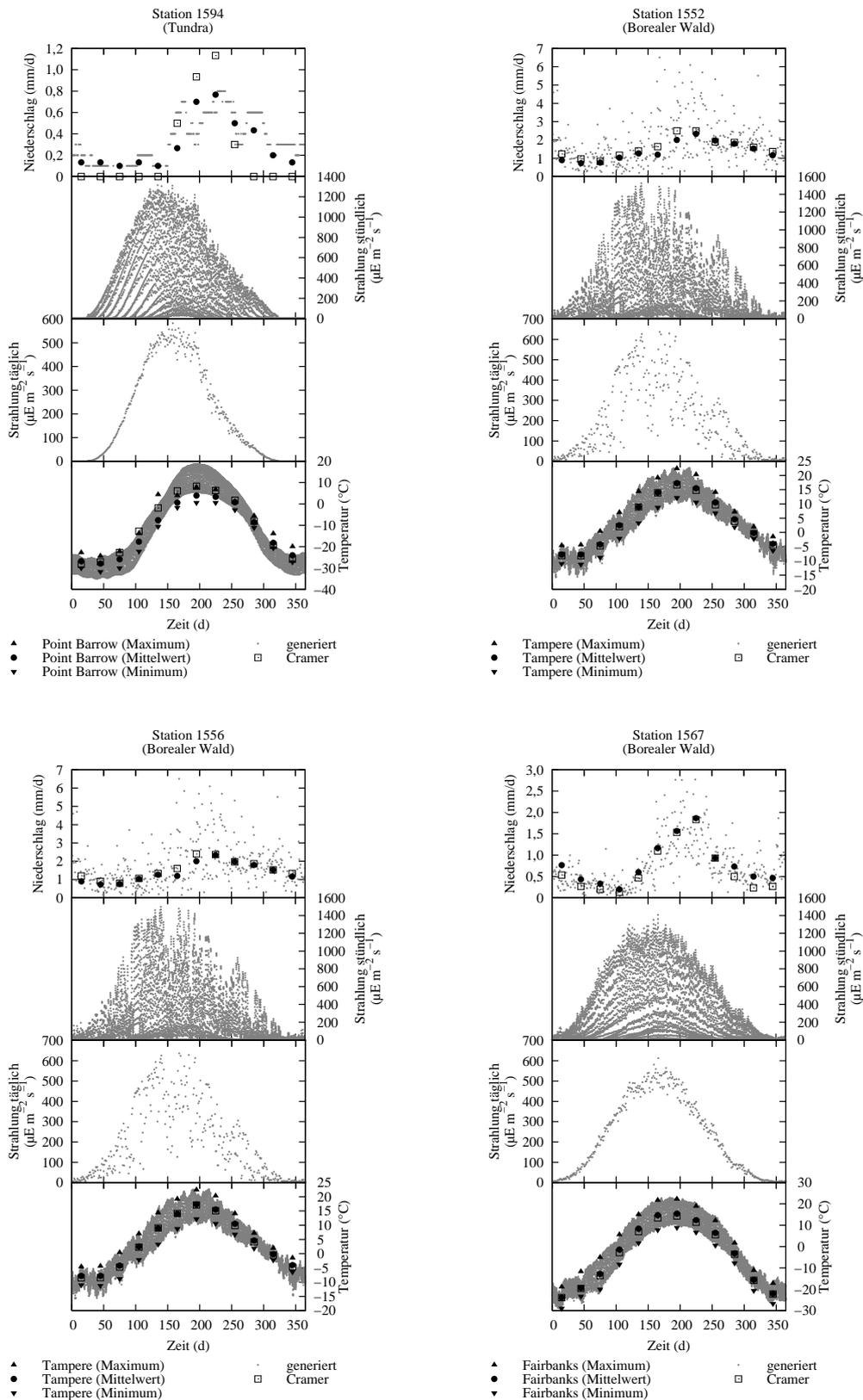


Abbildung C.2: Prüfung der generierten Wetterdaten (Stationen 1594, 1552, 1556, 1567) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

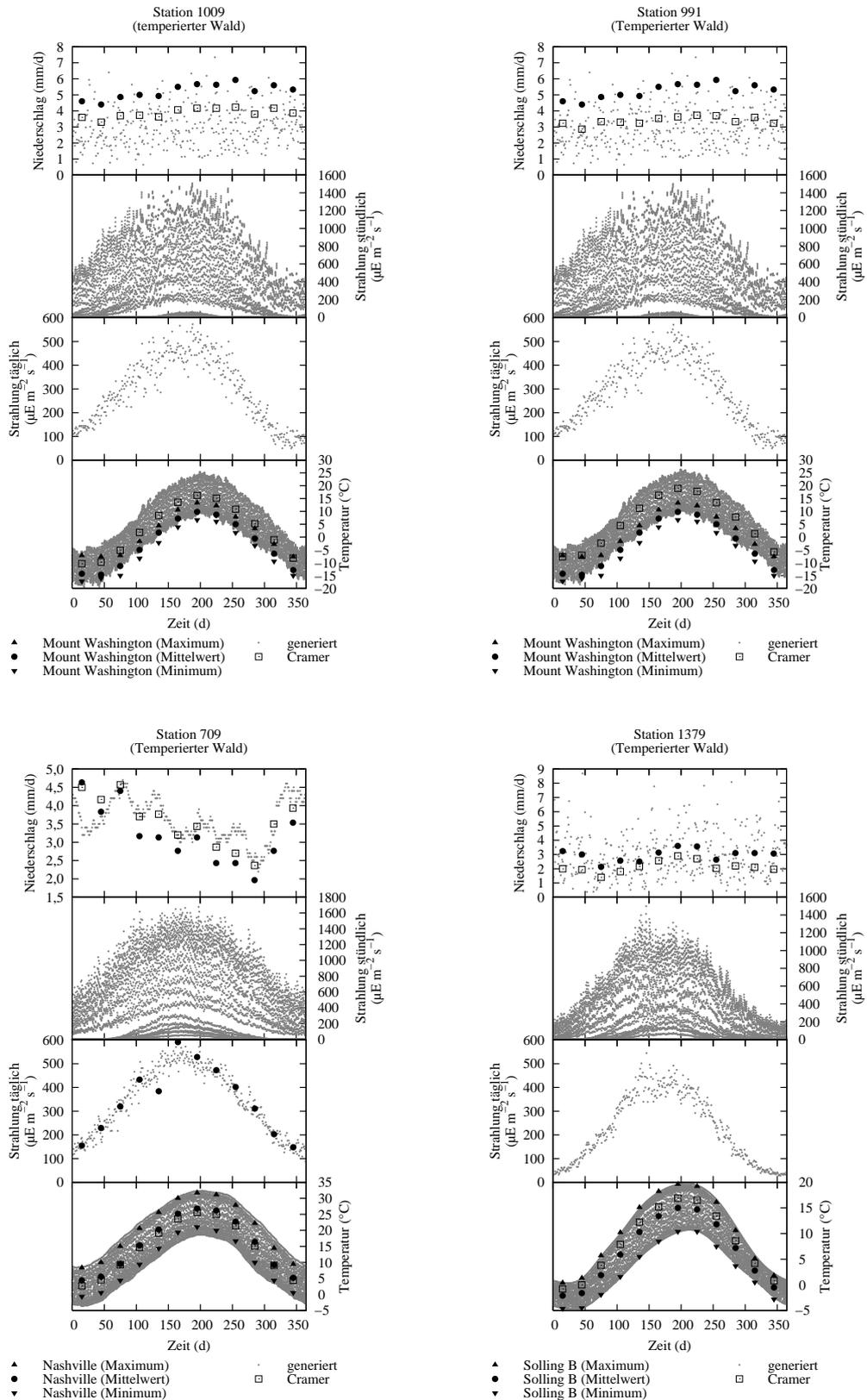


Abbildung C.3: Prüfung der generierten Wetterdaten (Stationen 1009, 991, 709, 1379) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

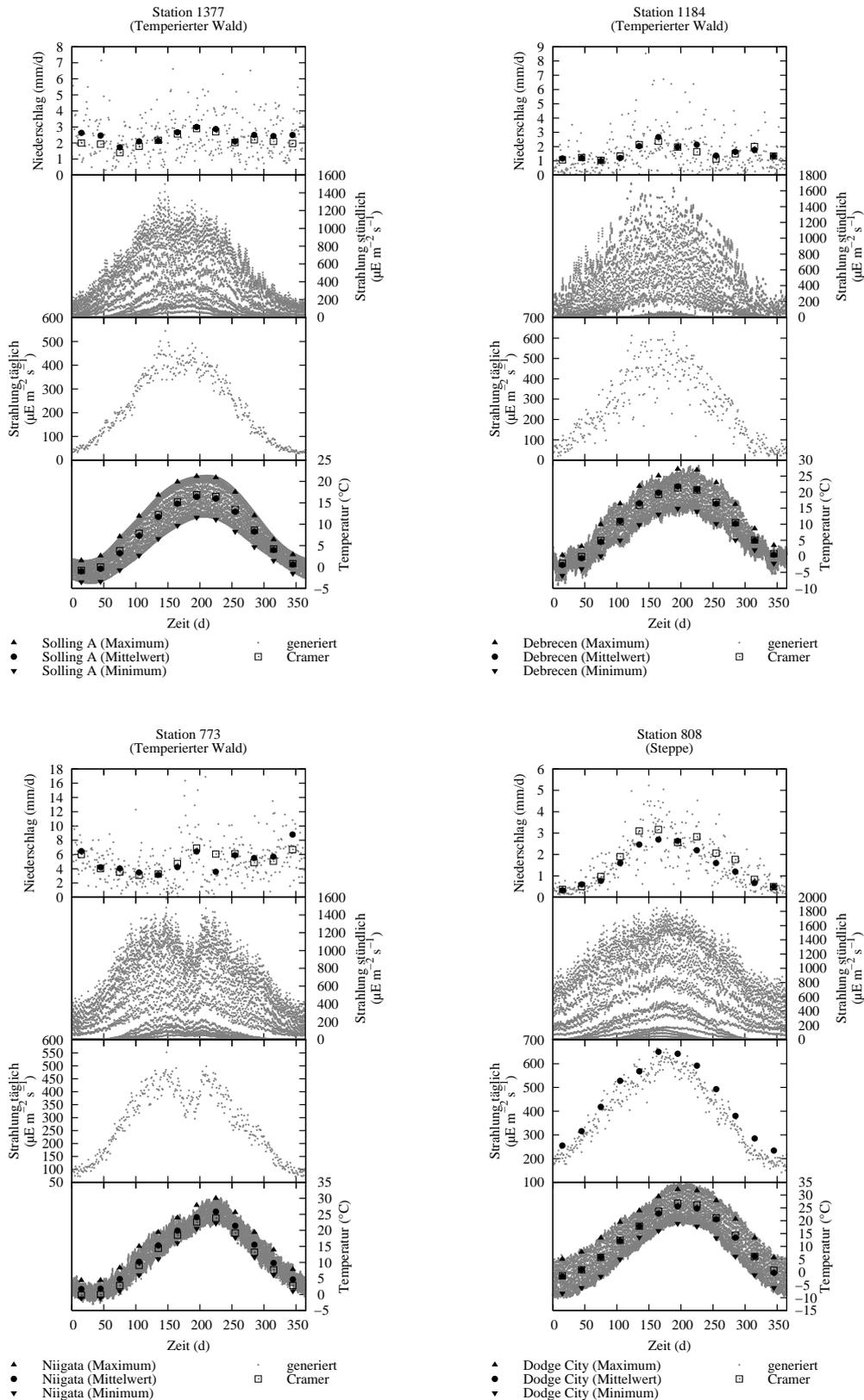


Abbildung C.4: Prüfung der generierten Wetterdaten (Stationen 1377, 1184, 773, 808) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

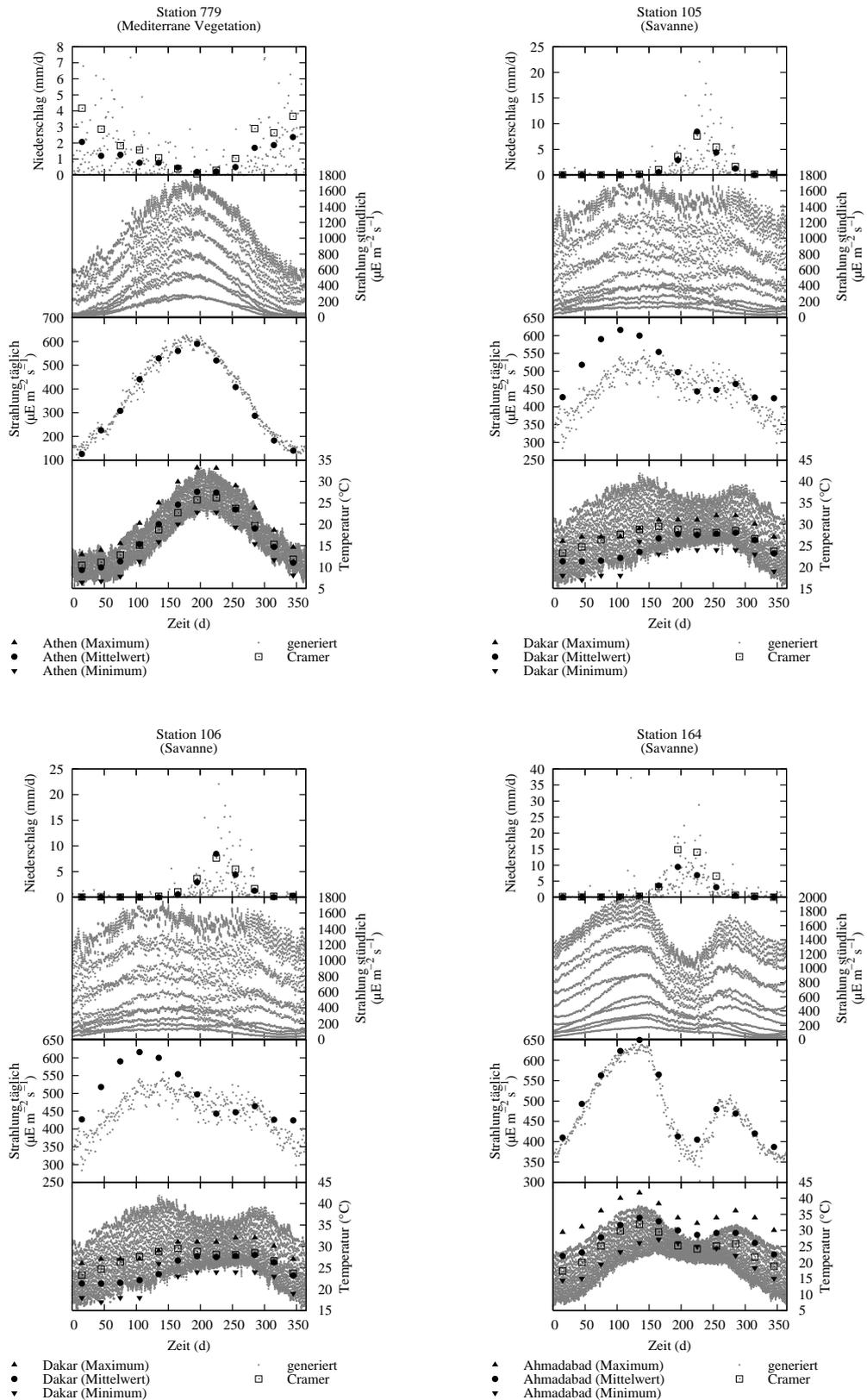


Abbildung C.5: Prüfung der generierten Wetterdaten (Stationen 779, 105, 106, 164) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

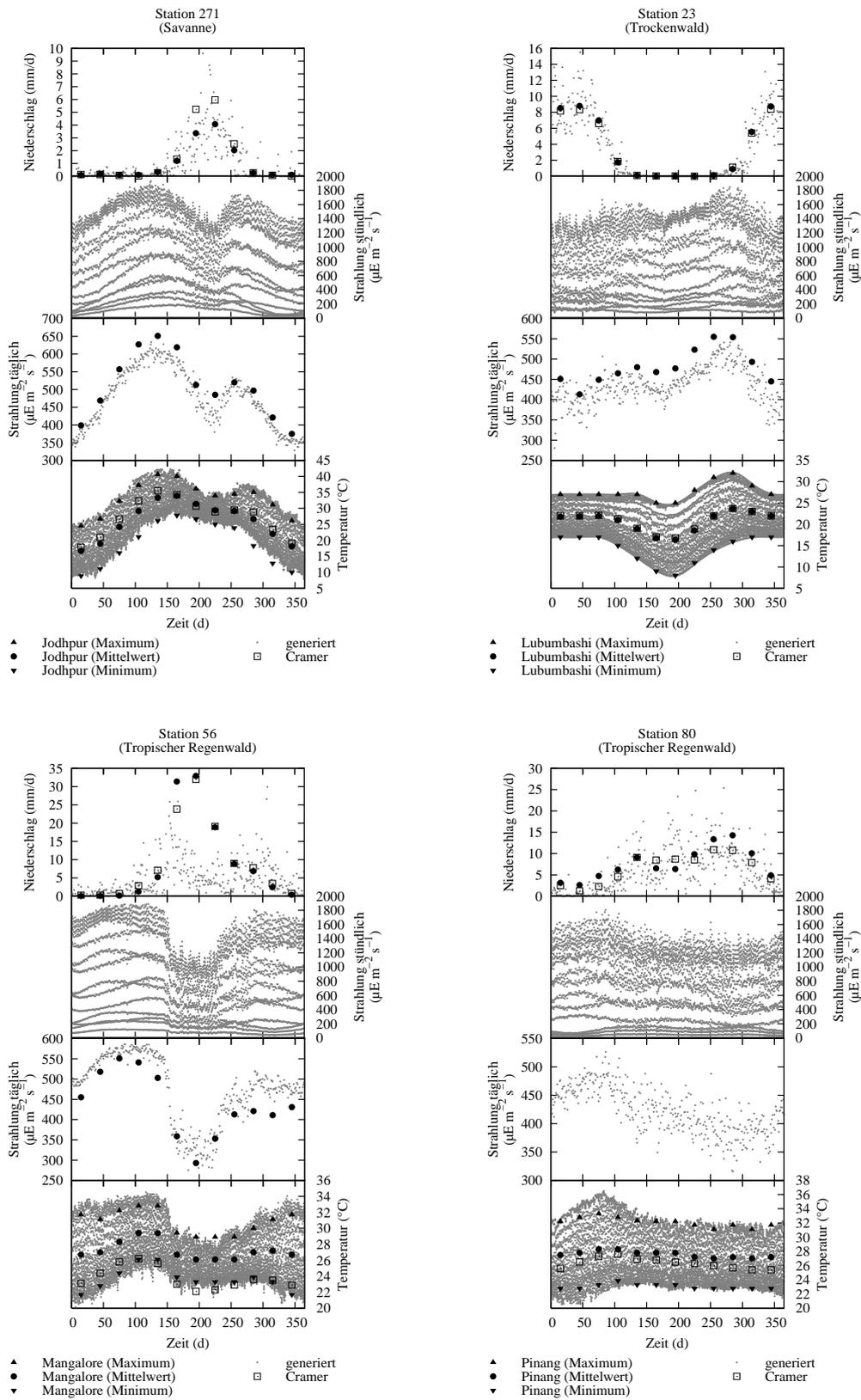


Abbildung C.6: Prüfung der generierten Wetterdaten (Stationen 271, 23, 56, 80) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

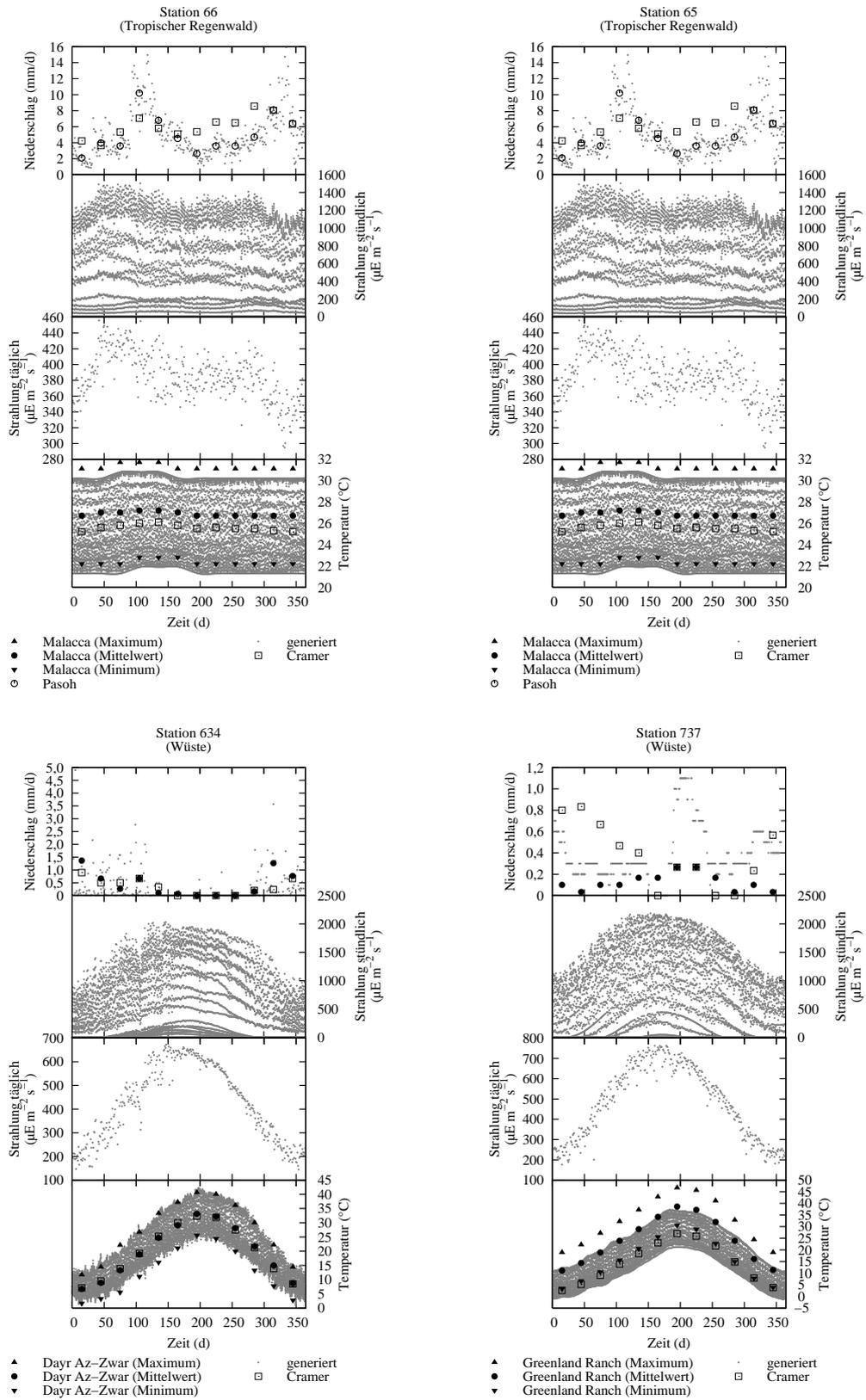


Abbildung C.7: Prüfung der generierten Wetterdaten durch (Stationen 66, 65, 634, 737) Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

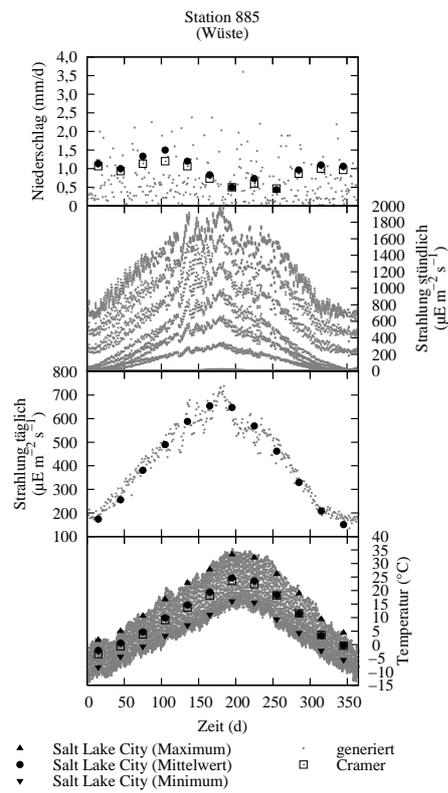


Abbildung C.8: Prüfung der generierten Wetterdaten (Station 885) durch Vergleich mit Stationsdaten (Stationsname ist in der Legende angegeben) und durch Vergleich mit dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991).

Station 1594 (Tundra)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Point Barrow (BAR)	0,1	12,1	71,7	167,6	245,0	251,1	214,1	111,3	54,2	18,6	1,2	0,0	96,0
generiert	0,2	13,6	68,2	164,0	249,1	245,4	214,1	104,5	64,5	23,2	2,2	0,0	96,2
Temperatur (°C)													
												Datenbasis: täglich	
Point Barrow	-26,8	-27,9	-25,9	-17,7	-7,6	0,6	3,9	3,3	0,8	-8,6	-18,2	-24,0	-12,4
Umiat (509539)	-29,2	-29,8	-27,7	-19,3	-4,9	7,7	11,8	8,8	1,3	-12,1	-24,3	-28,2	-12,1
generierte Monatsmittel	-29,3	-29,5	-27,4	-19,1	-4,5	8,1	12,1	9,0	1,0	-12,0	-24,0	-27,9	-11,9
generierte Min-Max-Mittel	-29,2	-29,8	-27,7	-19,3	-4,9	7,7	11,8	8,8	1,3	-12,1	-24,3	-28,2	-12,1
Leemans und Cramer (1991)	-28,3	-27,1	-22,8	-12,8	-1,9	6,1	8,3	6,3	1,7	-8,1	-19,4	-25,9	-10,3
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
												Datenbasis: täglich	
Point Barrow	4,0	4,0	3,0	4,0	3,0	8,0	21,0	23,0	15,0	13,0	6,0	4,0	109,0
Umiat (509539)	6,1	2,7	1,0	4,8	3,3	15,8	14,2	21,6	14,7	17,6	8,2	8,6	118,6
generiert	6,1	2,7	1,0	4,8	3,3	15,8	14,2	21,6	14,7	17,6	8,2	8,6	118,6
Leemans und Cramer (1991)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	28,0	34,0	9,0	0,0	0,0	0,0	86,0
Station 1552 (Borealer Wald)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Jokioinen (029630)	8,6	31,8	72,3	166,6	229,6	200,9	180,8	120,0	87,6	38,1	9,7	3,2	96,1
generiert	7,8	33,8	73,8	139,8	211,0	235,4	208,7	164,9	89,1	44,4	11,2	4,9	102,4
Temperatur (°C)													
												Datenbasis: täglich	
Tampere	-7,8	-7,8	-4,2	2,5	8,9	14,0	17,3	15,5	10,5	4,6	-0,2	-4,0	4,0
Kuorevesi (02945)	-9,6	-9,3	-3,7	2,0	9,1	13,9	16,1	14,1	8,9	4,3	-1,4	-7,1	3,2
generierte Monatsmittel	-9,2	-9,2	-3,7	2,0	9,3	14,2	16,5	14,2	8,7	4,1	-1,4	-6,9	3,3
generierte Min-Max-Mittel	-9,6	-9,3	-3,7	2,0	9,1	13,9	16,1	14,1	8,9	4,3	-1,4	-7,1	3,2
Leemans und Cramer (1991)	-8,1	-8,2	-4,7	2,0	8,9	13,9	16,7	14,8	9,7	3,9	-0,5	-4,4	3,7
Mälkönen (1975)													2,9
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
												Datenbasis: täglich	
Tampere	27,0	22,0	23,0	31,0	38,0	36,0	60,0	70,0	59,0	54,0	46,0	35,0	501,0
Kuorevesi (02945)	50,9	21,6	40,3	27,5	38,8	70,4	75,8	94,6	63,2	55,9	61,1	40,4	640,6
generiert	50,9	21,6	40,3	27,5	38,8	70,4	75,8	94,6	63,2	55,9	61,1	40,4	640,6
Leemans und Cramer (1991)	37,0	29,0	25,0	35,0	42,0	49,0	75,0	75,0	57,0	56,0	48,0	41,0	569,0
Mälkönen (1975)													576
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.5: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1594 und 1552). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesbezugnehmenden liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationennummern) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 1556 (Borealer Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Jokioinen (029630)	8,6	31,8	72,3	166,6	229,6	200,9	180,8	120,0	87,6	38,1	9,7	3,2	96,1
generiert	7,3	32,6	72,6	138,7	210,4	235,2	208,3	164,1	88,0	43,2	10,6	4,4	101,7
Temperatur (°C)													
Datenbasis: täglich													
Tampere	-7,8	-7,8	-4,2	2,5	8,9	14,0	17,3	15,5	10,5	4,6	-0,2	-4,0	4,0
Kuorevesi (02945)	-9,6	-9,3	-3,7	2,0	9,1	13,9	16,1	14,1	8,9	4,3	-1,4	-7,1	3,2
generierte Monatsmittel	-9,3	-9,2	-3,8	2,0	9,3	14,1	16,4	14,2	8,7	4,2	-1,4	-6,9	3,3
generierte Min-Max-Mittel	-9,6	-9,3	-3,7	2,0	9,1	13,9	16,1	14,1	8,9	4,3	-1,4	-7,1	3,2
Leemans und Cramer (1991)	-8,5	-8,4	-4,7	2,3	9,0	14,1	17,1	15,1	9,9	4,1	-0,5	-4,6	3,7
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
Datenbasis: täglich													
Tampere	27,0	22,0	23,0	31,0	38,0	36,0	60,0	70,0	59,0	54,0	46,0	35,0	501,0
Kuorevesi (02945)	50,9	21,6	40,3	27,5	38,8	70,4	75,8	94,6	63,2	55,9	61,1	40,4	640,6
generiert	50,9	21,6	40,3	27,5	38,8	70,4	75,8	94,6	63,2	55,9	61,1	40,4	640,6
Leemans und Cramer (1991)	36,0	27,0	24,0	32,0	40,0	48,0	72,0	71,0	59,0	56,0	46,0	40,0	551,0
Station 1567 (Borealer Wald)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Fairbanks (702610)	8,3	36,7	102,0	177,3	233,8	253,1	229,3	162,6	101,3	40,7	13,6	3,0	113,9
generiert	7,3	39,9	103,8	178,3	235,0	256,2	244,7	161,4	115,7	44,9	11,3	2,9	117,2
Temperatur (°C)													
Datenbasis: täglich													
Fairbanks	-23,9	-19,4	-12,8	-1,4	8,4	14,7	15,4	12,4	6,4	-3,2	-15,6	-22,1	-3,4
Fairbanks (502968)	-21,4	-17,9	-11,3	-0,9	9,1	15,4	16,6	13,7	7,2	-3,8	-14,4	-20,3	-2,2
generierte Monatsmittel	-22,0	-18,6	-12,3	-1,0	8,8	15,2	16,2	13,2	6,4	-4,6	-14,9	-20,9	-2,8
generierte Min-Max-Mittel	-22,0	-18,6	-12,0	-1,5	8,4	14,7	16,0	13,0	6,5	-4,5	-15,1	-21,0	-2,9
Leemans und Cramer (1991)	-23,9	-19,6	-13,6	-2,8	7,0	13,4	14,3	11,4	5,6	-3,6	-15,8	-22,2	-4,2
Van Cleve et al. (1981)													-3,4
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
Datenbasis: täglich													
Fairbanks	23,0	13,0	10,0	6,0	18,0	35,0	47,0	56,0	28,0	22,0	15,0	14,0	287,0
Fairbanks (502968)	14,4	10,8	9,9	6,6	15,4	33,6	47,0	45,7	26,3	20,7	17,6	20,4	268,3
generiert	14,4	10,8	9,9	6,6	15,4	33,6	47,0	45,7	26,3	20,7	17,6	20,4	268,3
Leemans und Cramer (1991)	16,0	8,0	6,0	4,0	14,0	33,0	46,0	55,0	28,0	15,0	7,0	8,0	240,0
Van Cleve et al. (1981)													276
Mai-Sep: 178													
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.6: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1556 und 1567). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrundeliegenden Wetterstationen.

Station 1009 (Temperierter Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Burlington (726170)	65,6	100,8	138,9	175,6	206,4	221,9	235,5	199,4	158,3	98,3	53,3	43,5	141,7
generiert	67,8	104,4	117,6	166,8	210,7	212,0	252,7	191,9	175,5	104,7	54,6	44,8	142,2
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Mount Washington	-14,3	-14,7	-11,3	-5,0	1,7	7,2	9,8	8,7	5,0	-0,6	-6,5	-12,9	-2,8
Plymouth 2 (276945)	-8,4	-7,0	-1,6	5,2	11,5	16,5	19,2	18,2	13,5	7,6	1,7	-5,6	6,0
generierte Monatsmittel	-8,5	-7,0	-2,1	4,7	11,1	16,2	18,8	17,6	12,8	7,1	1,5	-5,3	5,6
generierte Min-Max-Mittel	-8,4	-7,0	-1,6	5,2	11,5	16,5	19,2	18,2	13,5	7,6	1,7	-5,6	6,0
Leemans und Cramer (1991)	-10,4	-9,8	-5,2	1,8	8,4	13,6	16,2	15,1	10,9	5,2	-1,1	-8,2	3,0
Whittaker et al. (1974)	-9						17,5						
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: täglich													
Mount Washington	138,0	132,0	146,0	150,0	148,0	165,0	170,0	169,0	178,0	157,0	168,0	160,0	1881,0
Plymouth 2 (276945)	84,5	73,7	83,4	86,0	102,7	88,3	96,5	98,5	84,0	94,5	104,8	94,9	1091,8
generiert	84,5	73,7	83,4	86,0	102,7	88,3	96,5	98,5	84,0	94,5	104,8	94,9	1091,8
Leemans und Cramer (1991)	108,0	99,0	111,0	112,0	109,0	122,0	125,0	125,0	127,0	114,0	125,0	116,0	1393,0
Whittaker et al. (1974)													1250
Station 991 (Temperierter Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Burlington (726170)	65,6	100,8	138,9	175,6	206,4	221,9	235,5	199,4	158,3	98,3	53,3	43,5	141,7
generiert	66,7	102,8	115,8	164,4	207,7	209,0	249,2	189,1	173,0	103,1	53,7	44,0	140,1
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Mount Washington	-14,3	-14,7	-11,3	-5,0	1,7	7,2	9,8	8,7	5,0	-0,6	-6,5	-12,9	-2,8
Plymouth 2 (276945)	-8,4	-7,0	-1,6	5,2	11,5	16,5	19,2	18,2	13,5	7,6	1,7	-5,6	6,0
generierte Monatsmittel	-8,5	-7,0	-2,1	4,7	11,1	16,2	18,8	17,6	12,8	7,1	1,5	-5,3	5,6
generierte Min-Max-Mittel	-8,4	-7,0	-1,6	5,2	11,5	16,5	19,2	18,2	13,5	7,6	1,7	-5,6	6,0
Leemans und Cramer (1991)	-7,7	-7,1	-2,4	4,5	11,2	16,3	19,0	17,8	13,4	7,8	1,3	-5,8	5,7
Bormann et al. (1970)	-9						19						
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: täglich													
Mount Washington	138,0	132,0	146,0	150,0	148,0	165,0	170,0	169,0	178,0	157,0	168,0	160,0	1881,0
Plymouth 2 (276945)	84,5	73,7	83,4	86,0	102,7	88,3	96,5	98,5	84,0	94,5	104,8	94,9	1091,8
generiert	84,5	73,7	83,4	86,0	102,7	88,3	96,5	98,5	84,0	94,5	104,8	94,9	1091,8
Leemans und Cramer (1991)	97,0	86,0	100,0	99,0	97,0	106,0	109,0	112,0	111,0	100,0	108,0	97,0	1222,0
Bormann et al. (1970)													1230
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.7: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1009 und 991). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der dieselben zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 709 (Temperierter Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung ($W m^{-2}$)													
Nashville	72,8	119,0	150,2	210,0	180,2	286,6	247,8	222,0	195,0	146,0	98,5	69,5	172,7
Nashville/Metropolitan (723270)	80,0	112,6	154,3	208,6	238,7	259,7	245,1	228,1	179,6	147,1	93,3	70,5	168,4
generiert	89,7	118,6	152,8	211,5	233,8	252,2	262,5	238,7	178,3	163,4	95,9	65,5	172,2
Temperatur ($^{\circ}C$) Datenbasis: täglich													
Nashville	4,4	5,6	9,5	15,3	20,3	25,2	26,8	26,2	22,7	16,4	9,2	5,2	15,6
Franklin (403280)	2,7	5,0	9,8	14,7	19,2	23,3	25,3	24,6	21,3	15,3	9,9	4,9	14,7
generierte Monatsmittel	1,8	4,0	9,1	14,1	18,7	22,7	24,7	24,1	20,6	14,2	8,9	4,1	14,0
generierte Min-Max-Mittel	2,7	5,0	9,8	14,7	19,2	23,3	25,3	24,6	21,3	15,3	9,9	4,9	14,7
Leemans und Cramer (1991)	2,7	4,5	9,3	14,7	19,2	23,6	25,6	25,0	21,4	15,1	9,1	4,4	14,6
Niederschlag ($mm mon^{-1}$) Datenbasis: täglich													
Nashville	139,0	115,0	132,0	95,0	94,0	83,0	94,0	73,0	73,0	59,0	83,0	106,0	1146,0
Franklin (403280)	112,0	102,1	136,2	116,8	124,2	97,3	106,3	100,3	98,1	80,1	110,9	133,0	1317,3
generiert	112,0	102,1	136,2	116,8	124,2	97,3	106,3	100,3	98,1	80,1	110,9	133,0	1317,3
Leemans und Cramer (1991)	135,0	125,0	137,0	111,0	113,0	96,0	103,0	86,0	81,0	71,0	105,0	118,0	1281,0
Station 1379 (Temperierter Wald)													
Strahlung ($W m^{-2}$)													
Kassel (104380)	27,4	58,0	94,9	153,5	201,8	199,2	200,3	170,0	116,5	66,6	33,2	19,9	112,1
generiert	30,9	58,6	94,4	163,6	213,6	216,6	194,3	159,6	117,5	66,9	33,3	18,6	114,2
Temperatur ($^{\circ}C$) Datenbasis: monatlich													
Solling B	-2,1	-1,6	1,9	5,9	10,3	13,4	15,0	14,7	11,8	7,2	2,8	-0,5	6,6
generierte Monatsmittel	-2,1	-1,8	1,4	5,4	9,9	13,2	14,7	14,3	11,2	6,8	2,7	-0,3	6,3
generierte Min-Max-Mittel	-2,0	-1,5	1,7	5,7	10,0	13,2	14,9	14,7	11,8	7,2	2,9	-0,4	6,6
Leemans und Cramer (1991)	-0,8	0,0	3,8	7,9	12,2	15,2	16,9	16,5	13,4	8,6	4,2	0,8	8,2
Lieth (1978)													6,5
Niederschlag ($mm mon^{-1}$) Datenbasis: monatlich													
Solling B	97,0	90,0	64,0	77,0	75,0	94,0	108,0	107,0	79,0	93,0	93,0	92,0	1068,0
generiert	97,0	90,0	64,0	77,0	75,0	94,0	108,0	107,0	79,0	93,0	93,0	92,0	1069,0
Leemans und Cramer (1991)	60,0	58,0	42,0	54,0	65,0	77,0	87,0	81,0	61,0	66,0	63,0	59,0	773,0
Lieth (1978)													1100
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.8: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 709 und 1379). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der dies zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 1377 (Temperierter Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Kassel (104380)	27,4	58,0	94,9	153,5	201,8	199,2	200,3	170,0	116,5	66,6	33,2	19,9	112,1
generiert	31,2	59,1	95,1	164,6	214,8	217,7	195,4	160,6	118,3	67,5	33,6	18,8	115,0
Temperatur (°C)													
												Datenbasis: monatlich	
Solling A	-1,0	-0,4	3,2	7,3	11,7	14,8	16,4	16,0	12,9	8,3	4,0	0,6	7,8
generierte Monatsmittel	-1,0	-0,6	2,7	6,8	11,3	14,6	16,1	15,5	12,3	7,9	3,9	0,8	7,6
generierte Min-Max-Mittel	-0,9	-0,3	3,0	7,1	11,5	14,6	16,3	15,9	12,9	8,4	4,0	0,8	7,8
Leemans und Cramer (1991)	-0,8	0,0	3,8	7,9	12,2	15,2	16,9	16,5	13,4	8,6	4,2	0,8	8,2
Lieith (1978)													6,5
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
												Datenbasis: monatlich	
Solling A	79,0	74,0	52,0	63,0	64,0	80,0	90,0	86,0	63,0	75,0	73,0	75,0	873,0
generiert	79,0	74,0	52,0	63,0	64,0	80,0	90,0	86,0	63,0	75,0	73,0	75,0	874,0
Leemans und Cramer (1991)	60,0	58,0	42,0	54,0	65,0	77,0	87,0	81,0	61,0	66,0	63,0	59,0	773,0
Lieith (1978)													1100
Station 1184 (Temperierter Wald)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Tiszaors (128821)	33,5	78,9	107,7	165,8	217,0	229,9	234,7	189,3	140,9	93,0	38,0	22,7	129,5
generiert	29,9	76,8	101,9	158,5	212,6	215,6	236,7	194,6	135,2	85,8	31,9	22,0	125,4
Temperatur (°C)													
												Datenbasis: täglich	
Debrecen	-2,7	-0,6	4,5	11,0	16,5	19,8	21,8	20,8	16,4	10,2	4,9	0,5	10,3
Miskolc (12772)	-2,6	-0,8	5,1	9,8	15,0	18,0	19,7	19,3	15,8	10,1	3,3	-0,8	9,4
generierte Monatsmittel	-2,9	-1,1	4,6	9,3	15,0	18,1	19,7	18,9	15,0	9,5	3,2	-0,8	9,1
generierte Min-Max-Mittel	-2,6	-0,8	5,1	9,8	15,0	18,0	19,7	19,3	15,8	10,1	3,3	-0,8	9,4
Leemans und Cramer (1991)	-2,2	-0,1	4,9	10,8	15,9	19,3	21,3	20,7	16,8	10,5	5,1	0,8	10,3
Reichle (1981)													9,9
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
												Datenbasis: täglich	
Debrecen	35,0	36,0	30,0	36,0	61,0	80,0	59,0	64,0	41,0	49,0	53,0	40,0	584,0
Miskolc (12772)	24,6	25,0	30,6	45,6	68,9	75,2	59,4	63,0	36,2	34,9	44,6	29,5	537,5
generiert	24,6	25,0	30,6	45,6	68,9	75,2	59,4	63,0	36,2	34,9	44,6	29,5	537,5
Leemans und Cramer (1991)	32,0	37,0	31,0	40,0	64,0	71,0	59,0	49,0	34,0	45,0	60,0	40,0	562,0
DeAngelis et al. (1981)													582
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.9: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 1377 und 1184). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4. Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumtemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 773 (Temperierter Wald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m^{-2})													
Wajima (476000)	49,5	74,7	129,1	185,8	213,5	195,7	195,7	198,1	145,5	115,0	70,6	46,7	135,3
generiert	49,3	78,6	142,4	200,0	210,5	182,4	232,8	208,5	168,1	106,4	70,7	50,1	142,0
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)													
													Datenbasis: täglich
Niigata	1,7	1,8	4,8	10,2	15,3	19,9	24,1	25,8	21,4	15,5	9,8	4,7	12,9
Niigata (47604)	2,6	2,5	5,6	11,4	16,6	21,2	24,7	26,8	22,2	16,2	10,4	5,8	13,9
generierte Monatsmittel	1,1	0,9	4,2	9,9	15,0	19,6	23,0	25,1	20,7	14,7	9,2	4,4	12,4
generierte Min-Max-Mittel	1,2	1,0	4,2	10,0	15,2	19,8	23,2	25,4	20,8	14,8	9,0	4,4	12,5
Leemans und Cramer (1991)	-0,2	0,0	2,8	9,1	14,4	18,5	22,6	23,8	19,2	13,2	7,7	2,8	11,2
Tadaki et al. (1969)													9,3-10,1
Niederschlag (mm mon^{-1})													
													Datenbasis: täglich
Niigata	194,0	126,0	121,0	104,0	95,0	127,0	193,0	107,0	177,0	165,0	171,0	264,0	1844,0
Niigata (47604)	177,4	133,0	106,2	107,3	104,1	139,6	193,9	111,5	159,9	156,3	206,9	189,1	1785,1
generiert	177,4	133,0	106,2	107,3	104,1	139,6	193,9	111,5	159,9	156,3	206,8	189,1	1785,1
Leemans und Cramer (1991)	180,0	121,0	106,0	93,0	98,0	142,0	207,0	182,0	183,0	146,0	152,0	201,0	1811,0
Tadaki et al. (1969)													2330-2950
Station 808 (Steppe/Prairie)													
Strahlung (W m^{-2})													
Dodge City	119,7	164,2	196,2	256,1	266,6	315,3	301,3	277,9	239,1	178,4	138,2	109,8	216,8
Dodge City (724510)	110,7	149,8	192,9	237,2	267,2	299,5	293,2	256,9	205,9	161,9	110,7	95,9	198,7
generiert	101,2	152,0	197,2	213,0	256,2	300,8	271,2	241,4	206,1	143,0	109,7	91,6	190,4
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)													
													Datenbasis: täglich
Dodge City	-1,7	0,9	5,8	12,2	17,8	22,8	25,6	24,8	20,6	13,4	6,1	-0,3	12,5
Hays 1 (143527)	-2,2	0,4	5,1	11,7	17,0	22,9	26,3	25,4	20,4	13,5	5,2	-0,5	12,2
generierte Monatsmittel	-3,4	-0,7	4,3	11,2	16,8	22,7	26,2	24,9	19,6	12,2	3,6	-2,0	11,4
generierte Min-Max-Mittel	-2,2	0,4	5,1	11,7	17,0	22,9	26,3	25,4	20,4	13,5	5,2	-0,5	12,2
Leemans und Cramer (1991)	-1,5	0,9	5,7	12,4	17,9	23,7	26,8	26,1	21,1	14,3	6,0	0,7	12,8
Niederschlag (mm mon^{-1})													
													Datenbasis: täglich
Dodge City	10,0	18,0	23,0	48,0	74,0	81,0	79,0	66,0	48,0	36,0	20,0	15,0	518,0
Hays 1 (143527)	9,5	16,2	33,9	52,1	85,1	95,1	77,9	71,5	55,3	35,2	23,4	14,1	569,4
generiert	9,5	16,2	33,9	52,1	85,1	95,1	77,9	71,5	55,3	35,2	23,4	14,1	569,4
Leemans und Cramer (1991)	11,0	15,0	29,0	57,0	93,0	95,0	77,0	85,0	62,0	53,0	25,0	15,0	617,0
Sims et al. (1978)													Apr-Sep: 437 591
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.10: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 773 und 808). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesjährigen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 779 (Mediterrane Vegetation)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Athen	59,1	117,4	144,6	213,9	248,3	271,6	276,9	244,1	197,9	134,7	88,8	65,7	175,6
Athens Obs, (167140)	79,1	108,9	157,2	213,1	260,7	291,0	290,6	261,4	209,1	144,3	95,3	72,6	182,3
generiert	83,2	108,5	162,1	189,4	243,2	290,2	291,7	272,4	209,7	150,4	98,5	70,5	181,2
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Athen	9,3	9,9	11,3	15,3	20,0	24,6	27,6	27,4	23,5	19,0	14,7	11,0	17,8
Athenai/Hellenikon (16716)	10,0	10,2	12,0	15,3	19,4	23,9	27,0	26,7	23,7	19,1	14,9	11,6	17,9
generierte Monatsmittel	9,8	10,1	12,0	15,4	19,5	24,1	27,1	27,0	24,1	19,2	14,7	11,3	17,9
generierte Min-Max-Mittel	10,0	10,2	12,0	15,3	19,4	23,9	27,0	26,7	23,7	19,1	14,9	11,6	17,9
Leemans und Cramer (1991)	9,2	9,8	11,2	15,0	19,7	24,3	26,9	26,8	23,1	18,5	14,7	11,2	17,5
Margaris (1976)													18,2
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: täglich													
Athen	62,0	36,0	38,0	23,0	23,0	14,0	6,0	7,0	15,0	51,0	56,0	71,0	402,0
Athenai/Hellenikon (16716)	39,8	55,0	50,7	39,1	15,8	6,0	7,7	5,5	6,4	42,8	58,2	64,9	391,9
generiert	39,8	55,0	50,7	39,1	15,8	6,0	7,7	5,5	6,4	42,8	58,2	64,9	391,9
Leemans und Cramer (1991)	87,0	58,0	48,0	27,0	27,0	17,0	9,0	5,0	14,0	73,0	63,0	88,0	516,0
Margaris (1976)													416
Station 105 (Savanne)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Louga (616121)	174,8	200,7	225,9	247,4	254,2	246,9	233,7	231,1	227,0	223,2	192,0	175,8	219,4
generiert	166,4	202,9	232,3	246,8	257,4	259,9	234,2	225,4	228,6	219,8	198,7	171,7	220,3
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Dakar	21,3	21,3	21,5	22,1	23,5	26,7	27,7	27,5	27,8	28,0	26,3	23,2	24,7
Rosso (61489)	23,5	26,0	28,0	29,5	30,8	31,2	30,6	30,5	30,9	31,4	28,1	24,8	28,8
generierte Monatsmittel	22,9	25,3	27,3	28,8	30,1	30,6	30,2	30,0	30,3	30,4	26,9	23,9	28,1
generierte Min-Max-Mittel	23,5	26,0	28,0	29,5	30,8	31,2	30,6	30,5	30,9	31,4	28,1	24,8	28,8
Leemans und Cramer (1991)	23,3	24,7	26,4	27,6	28,8	29,5	28,8	28,1	28,0	28,5	26,6	23,7	27,0
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: monatlich													
Louga	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0	12,0	69,0	150,0	128,0	38,0	1,0	2,0	405,0
generiert	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0	12,0	69,0	150,0	128,0	38,0	0,0	2,0	405,0
Leemans und Cramer (1991)	2,0	3,0	2,0	1,0	5,0	32,0	109,0	229,0	164,0	50,0	5,0	4,0	606,0
Cornet und Poupon (1977)													297-338
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.11: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 779 und 105). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesjährigen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4. Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 106 (Savanne)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Louga (616121)	174,8	200,7	225,9	247,4	254,2	246,9	233,7	231,1	227,0	223,2	192,0	175,8	219,4
generiert	166,4	202,9	232,3	246,8	257,4	259,8	234,2	225,4	228,6	219,8	198,6	171,7	220,3
Temperatur (°C)													
Datenbasis: täglich													
Dakar	21,3	21,3	21,5	22,1	23,5	26,7	27,7	27,5	27,8	28,0	26,3	23,2	24,7
Rosso (61489)	23,5	26,0	28,0	29,5	30,8	31,2	30,6	30,5	30,9	31,4	28,1	24,8	28,8
generierte Monatsmittel	22,9	25,3	27,3	28,8	30,1	30,6	30,2	30,0	30,3	30,4	26,9	23,9	28,1
generierte Min-Max-Mittel	23,5	26,0	28,0	29,5	30,8	31,2	30,6	30,5	30,9	31,4	28,1	24,8	28,8
Leemans und Cramer (1991)	23,3	24,7	26,4	27,6	28,8	29,5	28,8	28,1	28,0	28,5	26,6	23,7	27,0
Cornet und Poupon (1977)													für 1976: 27,9
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
Datenbasis: monatlich													
Louga	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0	12,0	69,0	150,0	128,0	38,0	1,0	2,0	405,0
generiert	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0	12,0	69,0	150,0	128,0	38,0	0,0	2,0	405,0
Leemans und Cramer (1991)	2,0	3,0	2,0	1,0	5,0	32,0	109,0	229,0	164,0	50,0	5,0	4,0	606,0
Cornet (1981a)			Jan-Mai: 1,5			37	105	176	134	39	Nov-Dez: 1,5		492
Station 164 (Savanne)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Ahmadabad	192,4	256,2	264,2	302,2	305,1	274,0	193,8	190,1	232,8	220,1	203,7	181,6	238,6
Ahmadabad (426470)	197,3	231,8	272,1	297,6	305,3	258,0	195,3	185,0	230,9	233,2	200,9	183,5	232,4
generiert	207,4	234,2	285,6	324,6	323,6	287,3	182,5	214,6	240,9	243,9	208,3	189,4	245,1
Temperatur (°C)													
Datenbasis: täglich													
Ahmadabad	22,0	23,1	27,8	31,7	33,9	32,8	30,0	28,6	29,2	29,2	26,1	22,5	28,1
Ahmedabad (42647)	20,2	22,6	27,2	31,7	33,8	32,9	29,6	28,1	29,3	28,4	24,8	21,5	27,5
generierte Monatsmittel	14,8	17,1	22,1	26,9	28,7	27,9	24,7	23,1	24,0	22,8	19,2	15,9	22,3
generierte Min-Max-Mittel	15,5	17,8	22,5	27,0	29,0	28,2	24,9	23,4	24,6	23,7	20,1	16,7	22,8
Leemans und Cramer (1991)	17,3	20,0	25,1	29,8	31,9	29,5	25,2	24,2	25,1	25,8	21,7	18,8	24,5
Niederschlag (mm mon ⁻¹)													
Datenbasis: täglich													
Ahmadabad	2,0	3,0	3,0	2,0	10,0	109,0	284,0	206,0	94,0	15,0	3,0	2,0	733,0
Ahmedabad (42647)	0,7	6,9	2,8	13,6	52,7	76,8	251,9	270,0	41,4	23,5	11,6	5,4	757,4
generiert	0,7	6,9	2,8	13,6	52,7	76,8	251,9	270,0	41,4	23,5	11,6	5,4	757,4
Leemans und Cramer (1991)	6,0	4,0	3,0	2,0	9,0	98,0	445,0	421,0	198,0	21,0	8,0	1,0	1216,0
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.12: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 106 und 164). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesjährigen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 271 (Savanne)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m^{-2})													
Jodhpur (423390)	186,2	219,7	259,1	285,8	296,1	278,9	237,7	219,3	248,6	228,8	190,2	174,6	235,4
generiert	184,3	222,8	258,6	278,1	285,3	275,9	244,9	233,0	243,9	236,7	185,0	171,7	235,0
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)													
Datenbasis: täglich													
Jodhpur	16,7	18,9	24,2	29,2	33,3	33,9	31,4	29,4	29,2	26,7	22,0	18,1	26,1
Jodhpur (42339)	17,4	19,9	25,2	31,0	33,9	34,4	31,2	29,8	30,2	28,2	23,0	18,8	26,9
generierte Monatsmittel	16,7	19,1	24,6	30,7	33,4	33,9	31,0	29,4	29,5	27,0	21,8	17,9	26,3
generierte Min-Max-Mittel	17,4	19,9	25,2	31,0	33,9	34,4	31,2	29,8	30,2	28,2	23,0	18,8	26,9
Leemans und Cramer (1991)	17,8	20,9	26,6	32,3	35,5	34,3	30,7	28,9	29,5	28,8	23,4	19,1	27,3
Niederschlag (mm mon^{-1})													
Datenbasis: monatlich													
Jodhpur	3,0	5,0	3,0	3,0	10,0	36,0	101,0	122,0	61,0	8,0	3,0	3,0	356,0
generiert	3,0	5,0	3,0	3,0	10,0	36,0	101,0	122,0	61,0	8,0	3,0	3,0	358,0
Leemans und Cramer (1991)	4,0	4,0	2,0	1,0	8,0	40,0	157,0	179,0	76,0	8,0	2,0	1,0	482,0
Station 23 (Trockenwald)													
Strahlung (W m^{-2})													
Lubumbashi/Karavia (643700)	195,7	191,0	210,1	215,1	219,9	210,9	220,0	233,5	250,7	247,2	215,6	193,4	217,1
generiert	204,7	191,6	208,6	209,3	214,7	205,6	219,5	226,0	253,7	258,6	207,5	196,5	216,5
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)													
Datenbasis: monatlich													
Lubumbashi	21,8	21,9	22,0	21,0	19,0	16,8	16,4	18,6	22,0	23,7	23,0	22,0	20,5
generierte Monatsmittel	21,4	21,4	21,2	19,9	18,2	15,9	15,6	18,4	21,4	23,0	22,3	21,4	20,0
generierte Min-Max-Mittel	22,0	22,0	22,0	21,1	19,5	17,2	16,6	19,4	22,4	23,9	23,0	22,1	20,9
Leemans und Cramer (1991)	22,0	22,0	22,1	21,3	19,1	17,0	16,8	18,9	22,0	23,7	23,0	22,0	20,8
DeAngelis et al. (1981)													20,3
Niederschlag (mm mon^{-1})													
Datenbasis: monatlich													
Lubumbashi	256,0	264,0	210,0	53,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	27,0	166,0	262,0	1244,0
generiert	256,0	264,0	210,0	53,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	27,0	166,0	262,0	1244,0
Leemans und Cramer (1991)	245,0	250,0	198,0	55,0	3,0	1,0	1,0	0,0	2,0	34,0	162,0	252,0	1203,0
DeAngelis et al. (1981)													1273
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.13: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 271 und 23). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4. Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumtemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 56 (Tropischer Regenwald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung ($W\ m^{-2}$)													
Mangalore	213,6	269,2	258,6	262,4	236,1	174,1	137,5	165,7	200,3	197,6	199,3	202,3	207,1
Goa/Panjim (431920)	231,7	258,5	274,1	282,9	275,6	186,4	164,9	185,1	218,2	229,9	223,9	218,6	228,9
generiert	250,5	271,9	282,0	290,3	271,2	177,0	161,7	172,5	220,4	238,6	238,0	242,9	234,5
Temperatur ($^{\circ}C$)													
												Datenbasis: täglich	
Mangalore	26,7	27,0	28,3	29,4	29,4	26,7	26,1	26,1	26,1	27,0	27,2	26,7	27,2
Mangalore/Bajpe (43284)	26,9	27,4	28,5	29,4	29,3	26,5	25,8	25,6	26,4	27,3	27,3	27,3	27,3
generierte Monatsmittel	26,1	26,7	28,1	29,1	29,0	26,0	25,3	25,1	25,9	26,6	26,3	26,5	26,7
generierte Min-Max-Mittel	26,9	27,4	28,5	29,4	29,3	26,5	25,8	25,6	26,4	27,3	27,3	27,3	27,3
Leemans und Cramer (1991)	23,1	24,4	25,8	26,2	25,6	23,0	22,1	22,3	22,9	23,6	23,5	22,9	23,8
Clark et al. (2001b)													27,0
Niederschlag ($mm\ mon^{-1}$)													
												Datenbasis: täglich	
Mangalore	3,0	3,0	5,0	38,0	157,0	942,0	988,0	567,0	267,0	206,0	74,0	13,0	3293,0
Mangalore/Bajpe (43284)	14,2	25,4	35,1	122,8	186,4	370,6	165,4	142,4	166,0	210,2	209,4	57,6	1705,6
generiert	14,2	25,4	35,1	122,8	186,4	370,6	165,4	142,4	166,0	210,2	209,4	57,6	1705,6
Leemans und Cramer (1991)	9,0	10,0	21,0	87,0	213,0	715,0	959,0	573,0	269,0	234,0	104,0	23,0	3217,0
Clark et al. (2001b)													5310
Station 80 (Tropischer Regenwald)													
Strahlung ($W\ m^{-2}$)													
Pinang/Bayan Lepas (486010)	228,6	233,8	238,3	224,8	204,1	203,7	199,9	196,3	192,5	189,0	197,6	203,1	209,2
generiert	215,7	228,1	229,6	230,3	198,4	227,7	218,1	203,8	195,2	194,3	202,3	208,3	212,5
Temperatur ($^{\circ}C$)													
												Datenbasis: täglich	
Pinang	27,5	27,8	28,3	28,3	27,8	27,8	27,8	27,2	27,0	27,2	27,0	27,2	27,6
Trang (48567)	26,9	27,8	28,9	29,0	28,3	27,8	27,2	27,5	27,1	27,2	27,0	26,7	27,6
generierte Monatsmittel	26,4	27,5	28,6	28,6	27,8	27,3	26,7	27,1	26,6	26,7	26,3	26,0	27,1
generierte Min-Max-Mittel	26,9	27,8	28,9	29,0	28,3	27,8	27,2	27,5	27,1	27,2	27,0	26,7	27,6
Leemans und Cramer (1991)	25,6	26,5	27,3	27,6	26,9	26,8	26,5	26,3	26,0	25,7	25,4	25,4	26,3
Yoda (1967)													26,5-27,5
Niederschlag ($mm\ mon^{-1}$)													
												Datenbasis: täglich	
Pinang	94,0	79,0	142,0	188,0	272,0	196,0	191,0	295,0	401,0	429,0	302,0	147,0	2736,0
Trang (48567)	21,7	8,7	54,2	124,8	252,6	178,3	338,0	270,1	359,0	266,7	179,5	86,1	2139,7
generiert	21,7	8,7	54,2	124,8	252,6	178,3	338,0	270,1	359,0	266,7	179,5	86,1	2139,7
Leemans und Cramer (1991)	75,0	38,0	69,0	138,0	273,0	254,0	261,0	256,0	327,0	323,0	236,0	123,0	2373,0
Ogawa et al. (1965)													2696
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.14: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 56 und 80). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitt C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus den globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 66 (Tropischer Regenwald)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Kuala Lumpur/Subang (486470)	180,9	204,9	208,9	200,8	191,8	188,6	188,1	189,5	188,3	190,6	170,0	170,1	189,3
generiert	178,3	207,1	205,3	209,1	197,5	194,0	196,9	197,2	175,7	205,9	169,6	185,1	193,4
Temperatur (°C) Datenbasis: monatlich													
Malacca	26,7	27,0	27,0	27,2	27,2	27,0	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,9
generierte Monatsmittel	25,1	25,2	25,6	25,9	25,8	25,5	25,1	25,1	25,2	25,2	25,1	25,2	25,3
generierte Min-Max-Mittel	25,5	25,5	25,8	26,1	26,1	25,8	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,7
Leemans und Cramer (1991)	25,2	25,6	25,8	26,0	26,1	25,8	25,5	25,6	25,5	25,5	25,3	25,2	25,6
Lieth (1978)													25
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: monatlich													
Pasoh	63,0	119,0	108,0	306,0	204,0	136,0	79,0	108,0	108,0	141,0	243,0	192,0	1807,0
generiert	63,0	119,0	108,0	306,0	204,0	136,0	79,0	108,0	108,0	141,0	243,0	192,0	1807,0
Leemans und Cramer (1991)	127,0	110,0	160,0	212,0	174,0	153,0	161,0	198,0	195,0	257,0	241,0	190,0	2178,0
Lieth (1978)													2000
Station 65 (Tropischer Regenwald)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Kuala Lumpur/Subang (486470)	180,9	204,9	208,9	200,8	191,8	188,6	188,1	189,5	188,3	190,6	170,0	170,1	189,3
generiert	178,3	207,1	205,3	209,1	197,5	194,0	196,9	197,2	175,7	205,9	169,6	185,1	193,4
Temperatur (°C) Datenbasis: monatlich													
Malacca	26,7	27,0	27,0	27,2	27,2	27,0	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,9
generierte Monatsmittel	25,1	25,2	25,6	25,9	25,8	25,5	25,1	25,1	25,2	25,2	25,1	25,2	25,3
generierte Min-Max-Mittel	25,5	25,5	25,8	26,1	26,1	25,8	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,7
Leemans und Cramer (1991)	25,2	25,6	25,8	26,0	26,1	25,8	25,5	25,6	25,5	25,5	25,3	25,2	25,6
Lieth (1978)													25
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: monatlich													
Pasoh	63,0	119,0	108,0	306,0	204,0	136,0	79,0	108,0	108,0	141,0	243,0	192,0	1807,0
generiert	63,0	119,0	108,0	306,0	204,0	136,0	79,0	108,0	108,0	141,0	243,0	192,0	1807,0
Leemans und Cramer (1991)	127,0	110,0	160,0	212,0	174,0	153,0	161,0	198,0	195,0	257,0	241,0	190,0	2178,0
Lieth (1978)													2000
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.15: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 66 und 65). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der diesen zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 634 (Wüste)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m ⁻²)													
Raqqa (400390) generiert	99,0 105,0	136,9 132,6	192,0 201,4	230,7 232,5	295,5 294,4	311,4 305,3	306,4 307,0	283,4 285,0	229,0 230,2	172,8 184,8	126,0 133,4	96,4 96,3	207,0 209,4
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Dayr Az-Zwar Abu Kamal (40072) generierte Monatsmittel generierte Min-Max-Mittel Leemans und Cramer (1991)	6,7 8,1 7,3 8,1 7,1	8,9 10,2 9,6 10,2 9,5	13,3 14,0 13,7 14,0 13,9	18,9 19,8 19,6 19,8 19,2	24,7 25,2 25,2 25,2 25,2	29,1 29,7 29,8 29,7 30,0	33,1 32,5 32,8 32,5 32,3	32,2 31,7 31,8 31,7 31,9	28,1 28,3 27,8 28,3 27,5	21,7 22,0 21,1 22,0 21,3	15,0 14,8 13,9 14,8 13,9	8,7 9,3 8,4 9,3 8,5	20,0 20,5 20,1 20,5 20,0
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: täglich													
Dayr Az-Zwar Abu Kamal (40072) generiert Leemans und Cramer (1991)	41,0 12,4 12,4 27,0	20,0 13,8 13,8 15,0	8,0 10,7 10,7 15,0	20,0 15,7 15,7 20,0	3,0 1,7 1,7 10,0	2,0 0,2 0,2 0,0	0,0 0,6 0,6 0,0	0,0 1,2 1,2 0,0	0,0 0,1 0,1 0,0	5,0 7,9 7,9 6,0	38,0 14,0 14,0 7,0	23,0 10,5 10,5 20,0	160,0 88,8 88,8 120,0
Station 737 (Wüste)													
Strahlung (W m ⁻²)													
Desert Rock SURFRAD (DRA) generiert	121,9 122,2	159,6 156,5	228,3 223,7	285,9 256,5	339,1 341,5	356,9 367,8	338,1 350,0	307,5 302,2	258,0 261,5	193,0 200,2	139,9 139,0	115,1 111,9	237,3 236,5
Temperatur (°C) Datenbasis: täglich													
Greenland Ranch Desert Rock WMSO (262251) generierte Monatsmittel generierte Min-Max-Mittel Leemans und Cramer (1991)	11,1 5,8 4,9 5,8 2,6	14,4 8,5 7,5 8,5 5,2	18,9 12,1 11,4 12,1 9,1	23,9 16,5 16,3 16,5 13,9	28,9 20,7 21,2 20,7 18,4	34,2 26,1 27,0 26,1 23,0	38,6 28,9 29,8 28,9 27,0	37,2 27,7 28,1 27,7 25,9	32,0 23,3 22,9 23,3 21,7	23,9 17,6 16,6 17,6 14,8	16,1 11,0 10,2 11,0 7,9	11,4 5,9 5,0 5,9 3,8	24,4 17,1 16,8 17,1 14,4
Niederschlag (mm mon ⁻¹) Datenbasis: täglich													
Greenland Ranch Desert Rock WMSO (262251) generiert Leemans und Cramer (1991)	3,0 14,9 14,9 24,0	1,0 6,7 6,7 25,0	3,0 7,0 7,0 20,0	3,0 8,1 8,1 14,0	5,0 8,6 8,6 12,0	5,0 0,0 0,0 0,0	8,0 26,1 26,1 8,0	8,0 23,8 23,8 8,0	5,0 8,3 8,3 0,0	1,0 9,1 9,1 0,0	3,0 15,7 15,7 7,0	1,0 15,7 15,7 17,0	41,0 144,0 144,0 135,0
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.16: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 634 und 737). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der dies zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C.2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumstemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Station 885 (Wüste)													
Datensatz ↓	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Strahlung (W m^{-2})													
Salt Lake City	81,7	133,0	178,8	237,7	276,0	317,2	303,7	267,1	224,1	154,4	100,9	70,9	198,4
Ely/Yelland (724860)	111,4	154,5	204,5	250,4	288,6	320,4	305,8	272,3	239,3	172,4	115,3	98,1	211,3
generiert	103,5	136,1	194,5	246,7	291,5	316,0	292,0	258,9	230,2	174,4	97,4	88,5	202,8
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)													
												Datenbasis: täglich	
Salt Lake City	-2,1	0,6	4,7	9,9	14,7	19,4	24,7	23,6	18,3	11,5	3,4	-0,2	10,7
Lucin UT (425239)	-5,3	-2,0	3,6	9,4	13,6	18,8	23,7	22,6	17,0	9,8	2,2	-4,1	9,2
generierte Monatsmittel	-5,6	-2,4	3,1	8,7	13,5	19,1	24,1	22,5	16,2	8,7	1,6	-4,8	8,8
generierte Min-Max-Mittel	-5,3	-2,0	3,6	9,4	13,6	18,8	23,7	22,6	17,0	9,8	2,2	-4,1	9,2
Leemans und Cramer (1991)	-3,5	-0,6	3,8	9,1	13,7	18,2	23,6	22,4	18,2	11,6	3,6	-0,4	10,0
Niederschlag (mm mon^{-1})													
												Datenbasis: täglich	
Salt Lake City	34,0	30,0	40,0	45,0	36,0	25,0	15,0	22,0	13,0	29,0	33,0	32,0	354,0
Lucin (425239)	17,3	12,6	21,3	18,2	19,0	16,8	17,3	18,7	16,1	12,9	12,6	17,0	200,0
generiert	17,3	12,6	21,3	18,2	19,0	16,8	17,3	18,7	16,1	12,9	12,6	17,0	200,0
Leemans und Cramer (1991)	32,0	28,0	34,0	36,0	32,0	22,0	15,0	18,0	14,0	26,0	30,0	29,0	316,0
Datensatz ↑	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

Tabelle C.17: Prüfung der Wetterdaten (Stationen 737 und 885). Monatliche und jährliche Strahlungs- und Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen. Verglichen werden monatlich bzw. jährlich aggregierte Daten der generierten Datensätze mit aggregierten Daten der Daten zugrunde liegenden Wetterstationen (siehe Abschnitte C:2 und 3.3.4, Angabe mit WMO-Stationnummer) und, wo zugänglich, Angaben einer weiteren namentlich angegebenen Station. Für Temperatur und Niederschlag zusätzlich Angaben aus dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991). Für generierte Temperaturen außerdem Mittelwerte basierend auf Tagesminimums- und -maximumtemperaturen, zum Vergleich mit den ebenso bestimmten Mittelwerten der zugrunde liegenden Wetterstationen.

Anhang D

Prüfung der Ermittlung des Bodenwasserpotentials

Das Bodenwasserpotential (Ψ_r) wurde nach einem Ansatz von Esser und Seekatz (unveröffentlicht) bestimmt (Abschnitt 2.2.1). Abweichend von diesem Ansatz wurde für diese Arbeit als zeitliche Auflösung der zur Berechnung des Feuchteindexes einzusetzenden Temperaturen und Niederschläge anstelle von Monaten Stunden (Niederschlag) und Minuten (Temperaturen) verwendet. Außerdem wurde die Zeitbasis des laufenden Mittelwerts (Gleichung 2.2) von zwei Monaten auf einen halben Monat reduziert.

Auf den folgenden Seiten ist das aus diesem Ansatz resultierende Bodenwasserpotential zusammen mit dem nach dem Originalansatz von Esser und Seekatz berechneten Bodenwasserpotential graphisch dargestellt (Abbildungen D.1 bis D.3).

Es zeigt sich, dass die Verwendung zeitlich höher aufgelöster Daten gegenüber den monatlichen Daten zu geringeren Werten führt. Da keine Messdaten zur Validierung vorliegen, ist es nicht möglich, die Qualität der verglichenen Ansätze zu beurteilen.

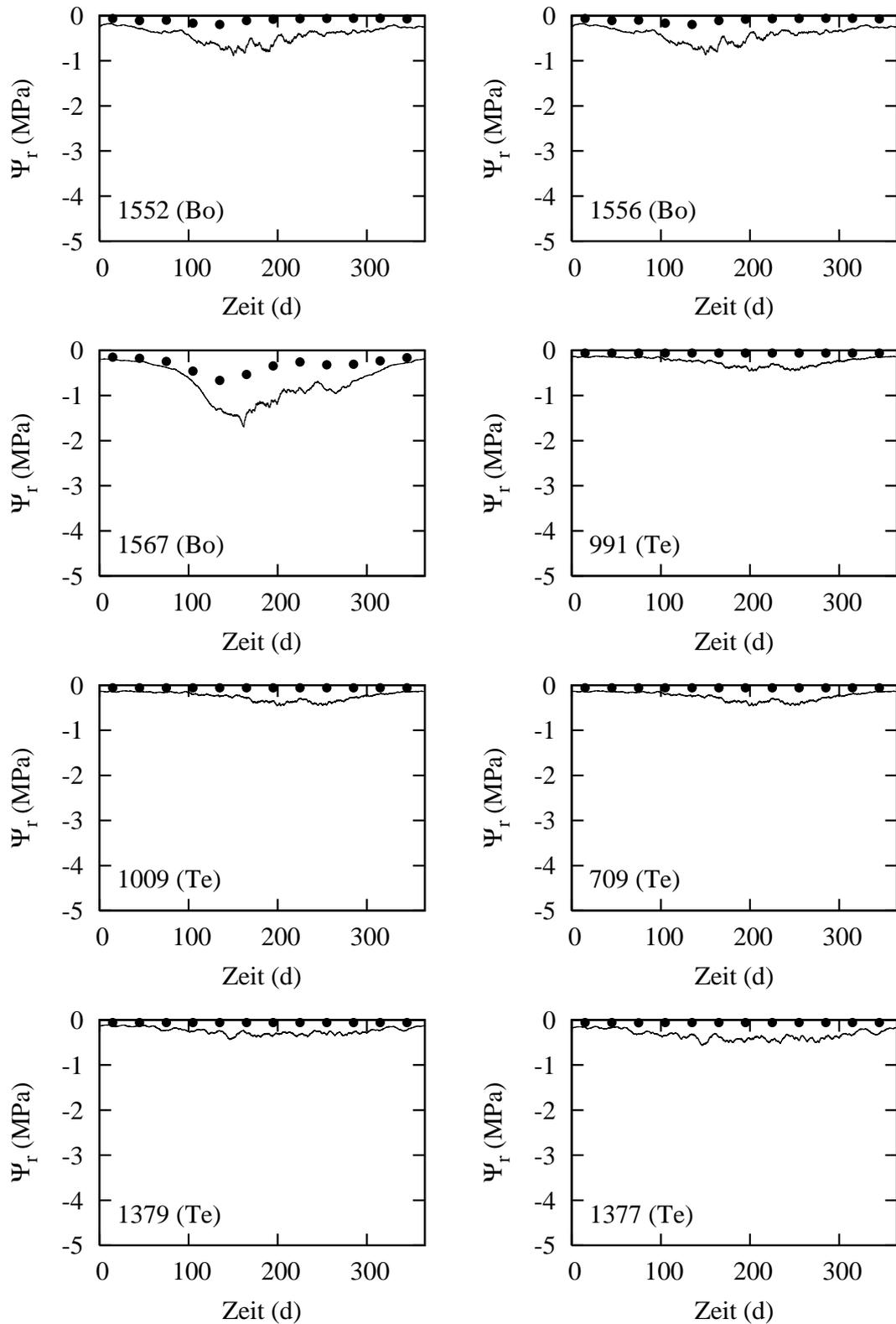


Abbildung D.1: Vergleich des Ansatzes zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials von Esser und Seekatz (Seekatz, 2006) mit der für diese Arbeit demgegenüber leicht veränderten Formulierung (siehe Abschnitt 2.2.1). Die monatlichen Bodenwasserpotentiale nach dem Originalansatz sind als Punkte dargestellt. Die Linie gibt die nach dem für diese Arbeit veränderten Ansatz bestimmten minutlichen Werte wieder. Vegetationstypen: Bo – Borealer Wald; Te – Temperierter Wald

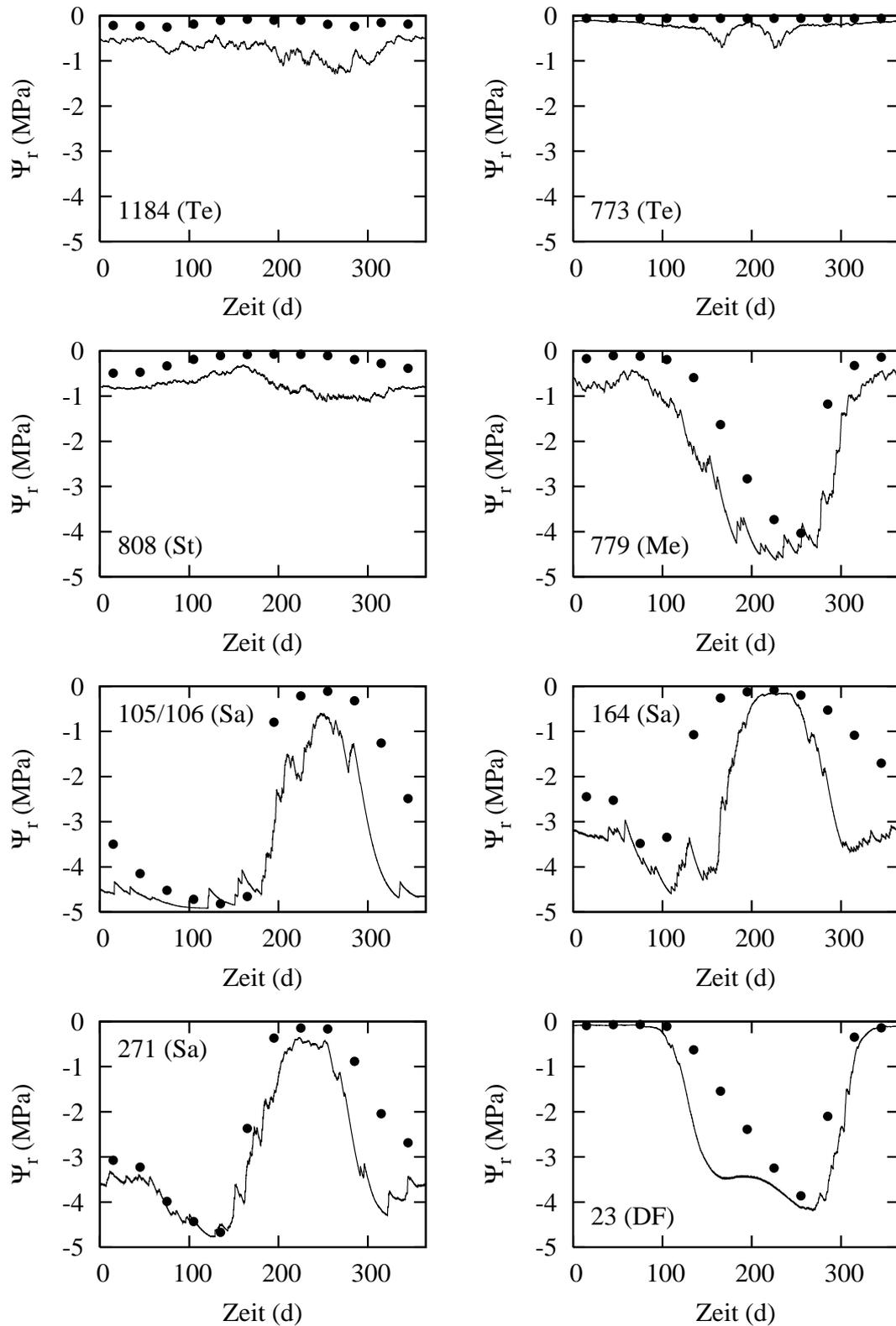


Abbildung D.2: Vergleich des Ansatzes zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials von Esser und Seekatz (Seekatz, 2006) mit der für diese Arbeit demgegenüber leicht veränderten Formulierung (siehe Abschnitt 2.2.1). Die monatlichen Bodenwasserpotentiale nach dem Originalansatz sind als Punkte dargestellt. Die Linie gibt die nach dem für diese Arbeit veränderten Ansatz bestimmten minütlichen Werte wieder. Vegetationstypen: Te – Temperierter Wald; St – Steppe, Prärie; Me – Mediterrane Vegetation; Sa – Savanne; DF – Trockenwald

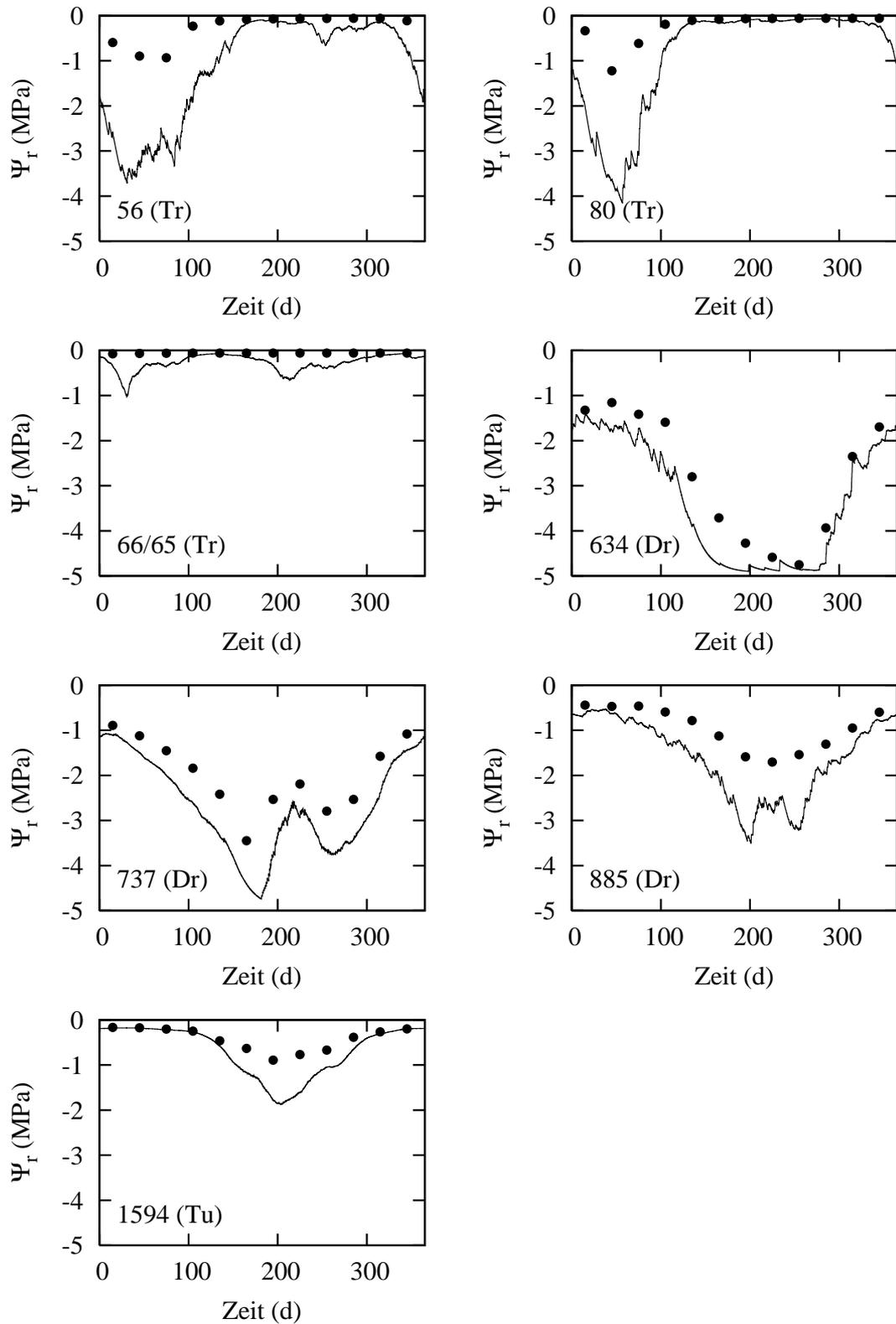


Abbildung D.3: Vergleich des Ansatzes zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials von Esser und Seekatz (Seekatz, 2006) mit der für diese Arbeit demgegenüber leicht veränderten Formulierung (siehe Abschnitt 2.2.1). Die monatlichen Bodenwasserpotentiale nach dem Originalansatz sind als Punkte dargestellt. Die Linie gibt die nach dem für diese Arbeit veränderten Ansatz bestimmten minutlichen Werte wieder. Vegetationstypen: Tr – Tropischer Regenwald; Dr – Wüste; Tu – Tundra

Anhang E

Bewertung von Modellläufen

Um den Vergleich zweier Datensätze bewerten zu können, ist es notwendig, quantitativ abschätzen zu können, wie gut ein Modell gemessene Daten wiedergibt oder wie sich mehrere Modellläufe darin unterscheiden. In dieser Arbeit wird nach Willmott (1982) vorgegangen. Die in dieser Arbeit verwendeten Größen werden im Folgenden beschrieben. Dabei werden auch die Beurteilungskriterien genannt.

Mittelwert und Standardabweichung. Mittelwert (\bar{O} für gemessene und \bar{M} für modellierte Werte) und Standardabweichung (SD_O für gemessenen und SD_M für modellierte Werte) wurden bestimmt. Modell- und Messdaten sollten gleiche Mittelwerte und Standardabweichungen haben.

Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß. Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) wurden berechnet. Sie sollten möglichst hohe Werte nahe 1 annehmen.

Steigung und Achsenabschnitt der linearen Regression. Durch eine lineare Regression mit den beiden jeweils zu vergleichenden Datensätzen lassen sich Offsets und sich mit der Höhe der Werte verändernde Abweichungen finden. Ersteres zeigt der Achsenabschnitt. Er sollte nahe 0 liegen. Letzteres kann man an der Steigung erkennen. Sie sollte nahe 1 liegen. Die lineare Regression wurde nach der bei Press et al. (1992b) beschriebenen Methode durchgeführt.

Mittlerer absoluter Fehler. Der mittlere absolute Fehler (MAE, engl. mean absolute error) wurde wie folgt bestimmt:

$$\text{MAE} = \frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} |M_i - O_i| \quad (\text{E.1})$$

\mathcal{N} ist die Anzahl der Datenpunkte, M_i der jeweilige modellierte und O_i der gemessene Wert. Beim Vergleich zweier Modellläufe werden für O_i die Werte des Vergleichs-laufs eingesetzt. MAE sollte möglichst kleine Werte annehmen.

Mittlere Abstandsquadrate. Die mittleren Abstandsquadrate (RMSE, engl. root mean square error) geben die mittlere Abweichung der modellierten von den

gemessenen Werten in der Einheit der eingegebenen Werte an:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (M_i - O_i)^2} \quad (\text{E.2})$$

Die mittleren Abstandsquadrate können nach Willmott (1982) in einen systematischen und einen unsystematischen Anteil zerlegt werden. Die systematischen mittleren Abstandsquadrate RMSE_S werden nach

$$\text{RMSE}_S = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (\widehat{M}_i - O_i)^2} \quad (\text{E.3})$$

und die unsystematischen mittleren Abstandsquadrate RMSE_U nach

$$\text{RMSE}_U = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{N}} \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (M_i - \widehat{M}_i)^2} \quad (\text{E.4})$$

berechnet. Dabei ist \widehat{M}_i der auf Basis des Messwertes von der linearen Regression vorhergesagte Modellwert. Sei a der durch die lineare Regression ermittelte Achsenabschnitt und m die zugehörige Steigung, so gilt $\widehat{M}_i = a + O_i \cdot m$. Die systematischen mittleren Abstandsquadrate sollten bei der Modellbewertung geringer als die unsystematischen sein, da sie im Modell enthaltene Fehler wiedergeben, während die unsystematischen mittleren Abstandsquadrate auch auf Streuungen in den Vergleichsdaten beruhen können.

Willmotts Übereinstimmungsindex. Willmotts Übereinstimmungsindex (auch als Willmotts d bekannt) berechnet sich wie folgt:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (|M_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|)^2} \quad (\text{E.5})$$

\overline{O} ist der Mittelwert der gemessenen Werte. Der Übereinstimmungsindex nimmt Werte zwischen 0 (keinerlei Übereinstimmung) und 1 (volle Übereinstimmung) an.

Anhang F

Ergebnistabellen

In diesem Abschnitt wird die Modell-NPP aller in dieser Arbeit dargestellten Modellläufe gezeigt. Die variierten Parameter sind in den Tabellen angegeben. Als Parameter für das Speicherungsmodell wurden, wenn nicht anders angegeben, die in Tabelle 3.7 (Seite 57) in der Spalte „gering“ gezeigten Werte verwendet.

Die erste Tabelle, Tabelle F.1, fasst noch einmal grundlegende Daten zu den NPP-Stationen zusammen.

Tabelle F.1: Geographische Breite (Lat), Referenztemperatur (T_{Ref}), mittlere Jahrestemperatur (\overline{T}_{ann}), NPP Vergleichsdaten von ORNL (siehe Abschnitt 3.2), Modell-NPP von HRBM, Gitterelementnummer (GE) in HRBM, GIWACOM und NCIM und Vegetationstypen der 25 verwendeten Stationen. NPP in $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$.

Station	Lat	T_{Ref} (°C)	\overline{T}_{ann} (°C)	NPP ORNL	NPP HRBM	GE HRBM	Vegetation
1594	69,37	7,0	-4,45	273	53	11411	Tundra
1552	61,67	13,0	3,29	310	213	21738	borealer Wald
1556	62,07	13,0	3,29	335	213	21754	borealer Wald
1567	64,75	13,0	-2,13	285	92	11554	borealer Wald
1009	44,00	17,0	-2,77	540	200	15158	temperierter Wald
991	43,92	20,0	-2,77	540	245	15150	temperierter Wald
709	36,00	19,0	14,23	420	476	14507	temperierter Wald
1379	51,82	19,0	8,51	650	779	22288	temperierter Wald
1377	51,82	19,0	8,51	710	779	22288	temperierter Wald
1184	47,90	19,0	9,08	510	399	22488	temperierter Wald
773	37,50	19,0	13,80	833	314	41103	temperierter Wald
808	38,87	19,0	11,35	500	638	13610	Steppe, Prärie
779	37,91	19,0	17,91	340	552	33804	mediterrane Vegetation
105	15,33	26,0	28,07	320	154	31312	Savanne
106	15,33	26,0	28,07	180	154	31312	Savanne
164	24,18	26,0	27,01	350	232	39222	Savanne
271	26,28	27,0	26,27	690	116	39198	Savanne
23	11,48	23,0	19,99	59	381	27388	Trockenwald
56	12,08	25,0	26,72	320	622	39359	tropischer Regenwald
80	7,58	25,0	27,12	935	689	57932	tropischer Regenwald
66	2,98	25,0	26,47	1015	545	41427	tropischer Regenwald
65	2,98	25,0	26,47	1270	545	41427	tropischer Regenwald
634	34,50	30,0	20,14	80	43	40867	Wüste
737	36,67	23,0	16,66	30	35	12352	Wüste
885	41,08	22,0	8,79	155	106	12528	Wüste

Tabelle F.2: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Speicherparametrisierung mit geringer Remobilisierungsschwelle ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$). In den drei Zeilen im Tabellenkopf sind die eingesetzten Werte für die Speicherparameter angegeben.

Station	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,05$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,20$
1594	107,5	109,0	104,5	107,5	107,8	104,5	105,2	104,5	104,5
1552	1179,3	1162,5	1158,0	1178,1	1159,9	1157,6	1177,1	1158,4	1157,3
1556	1124,4	1107,0	1102,2	1123,1	1104,2	1101,5	1122,0	1102,4	1101,2
1567	310,5	312,1	309,7	310,5	309,7	309,8	310,5	309,7	310,1
1009	1061,3	1061,0	1060,7	1061,3	1061,0	1060,7	1061,3	1061,0	1060,6
991	1234,7	1238,5	1234,5	1234,7	1234,6	1234,5	1234,7	1234,6	1234,4
709	632,7	535,7	513,3	632,8	516,9	492,5	633,9	498,9	475,5
1379	935,1	837,3	814,5	926,3	815,7	795,8	918,0	797,0	782,2
1377	736,6	605,9	573,2	725,0	574,5	548,3	714,5	549,5	525,5
1184	605,3	563,9	561,9	603,6	562,1	561,9	600,5	561,9	561,6
773	1010,2	981,5	981,2	1010,3	981,4	981,4	1010,4	981,4	981,7
808	1132,4	1120,3	1118,4	1128,1	1120,1	1118,2	1128,0	1120,0	1118,1
779	37,5	15,8	29,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
105	113,3	111,6	118,8	103,8	101,0	113,8	83,5	79,5	102,3
106	113,3	111,6	118,8	103,8	101,0	113,8	83,5	79,5	102,3
164	408,6	407,6	417,3	393,6	391,6	408,8	392,6	376,2	392,0
271	116,7	113,0	123,8	108,9	105,8	120,1	92,5	90,4	117,5
23	372,2	280,0	271,2	354,8	236,6	186,3	337,1	187,5	139,0
56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
634	40,6	40,5	44,8	33,5	33,7	41,2	19,1	19,7	33,4
737	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5
885	182,8	173,6	179,2	182,2	173,1	175,2	182,1	173,1	173,4

Tabelle F.3: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Speicherparametrisierung mit mittlerer Remobilisierungsschwelle ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$). In den drei Zeilen im Tabellenkopf sind die eingesetzten Werte für die Speicherparameter angegeben.

Station	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,10$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,20$
1594	108,6	104,5	106,1	108,5	104,5	105,4	104,5	104,5	104,4
1552	1166,9	1159,3	1157,6	1163,5	1157,6	1157,4	1160,8	1157,3	1157,0
1556	1111,8	1103,8	1101,6	1108,1	1101,6	1101,3	1105,2	1101,2	1100,9
1567	313,8	309,6	310,0	309,7	309,8	310,3	309,7	310,1	310,2
1009	1061,0	1060,6	1060,5	1061,1	1060,5	1060,5	1061,1	1060,5	1060,5
991	1236,5	1234,4	1234,2	1234,6	1234,3	1234,1	1234,6	1234,3	1234,1
709	560,2	526,8	508,5	542,1	507,0	487,1	524,2	486,2	473,0
1379	866,8	828,0	809,8	840,6	806,4	791,9	816,9	789,3	779,7
1377	649,3	592,5	567,1	612,8	562,7	542,9	577,4	538,9	521,1
1184	569,1	562,6	561,9	564,9	561,9	561,9	562,7	561,8	561,4
773	982,9	981,1	981,2	981,8	981,2	981,5	981,5	981,5	981,8
808	1121,5	1118,5	1118,0	1120,8	1118,2	1117,8	1120,6	1118,0	1117,8
779	24,6	28,1	45,2	0,0	0,0	8,8	0,0	0,0	0,0
105	111,4	118,3	120,9	100,8	113,3	120,0	79,1	102,4	116,5
106	111,4	118,3	120,9	100,7	113,3	120,0	79,1	102,3	116,5
164	407,2	417,4	421,9	391,0	409,4	419,8	379,6	392,6	412,2
271	112,5	123,8	125,0	104,0	120,4	124,7	87,4	117,8	121,3
23	320,3	277,8	289,1	285,2	220,6	176,7	242,8	169,1	131,5
56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
634	39,9	45,1	46,4	32,6	41,8	44,8	17,7	35,2	42,7
737	0,0	0,5	0,6	0,0	0,5	0,6	0,0	0,5	0,6
885	175,2	179,1	182,5	174,1	175,1	179,9	173,4	173,4	175,4

Tabelle F.4: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Speicherparametrisierung mit hoher Remobilisierungsschwelle ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$). In den drei Zeilen im Tabellenkopf sind die eingesetzten Werte für die Speicherparameter angegeben.

Station	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,05$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,10$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,07$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,15$ $k_{kapR} = 0,20$	$k_{rem} = 0,30$ $k_{kapA} = 0,25$ $k_{kapR} = 0,20$
1594	104,5	106,0	107,1	104,5	105,0	107,0	104,5	104,5	106,8
1552	1162,8	1158,5	1157,6	1159,1	1157,5	1157,3	1157,5	1157,2	1156,9
1556	1107,6	1102,8	1101,5	1103,5	1101,5	1101,2	1101,5	1101,1	1100,8
1567	309,6	309,8	310,1	309,7	310,1	310,3	309,9	310,3	310,2
1009	1060,6	1060,5	1060,5	1060,5	1060,5	1060,5	1060,4	1060,5	1060,5
991	1234,3	1234,2	1234,2	1234,2	1234,1	1234,1	1234,1	1234,1	1234,1
709	547,0	522,2	505,5	528,2	501,6	484,0	508,9	480,9	472,2
1379	851,0	823,1	807,0	826,1	801,8	789,7	803,5	785,7	779,0
1377	626,3	585,6	563,6	590,1	556,9	539,6	559,2	533,3	519,2
1184	564,6	562,2	561,9	562,3	561,9	561,8	561,8	561,8	561,3
773	981,1	981,1	981,3	981,1	981,3	981,6	981,2	981,6	981,8
808	1118,8	1118,1	1117,9	1118,3	1117,8	1117,7	1117,9	1117,7	1117,9
779	29,1	37,0	57,5	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	8,2
105	115,9	120,5	121,1	109,3	119,2	121,1	96,3	114,2	120,7
106	115,9	120,5	121,1	109,3	119,1	121,0	96,3	114,2	120,7
164	414,9	421,3	422,5	405,0	418,5	422,4	383,7	410,0	420,1
271	122,6	124,9	125,1	118,7	124,5	125,1	114,3	121,0	125,0
23	307,8	286,3	302,1	268,3	211,0	185,8	220,6	159,3	127,5
56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
634	45,0	46,5	46,9	41,7	45,3	46,5	35,1	42,9	45,8
737	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6
885	176,5	182,2	183,1	173,3	179,5	182,3	173,4	175,2	178,7

Tabelle F.5: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Im Tabellenkopf ist angegeben, wie die Parameter $M_{rN,Ref}$ (s^{-1}), k_{rN} (gC gN^{-1}) und b_{rN} (gN gC^{-1}) aus den Gleichungen 4.5 und 4.6 variiert wurden.

	$M_{rN,Ref}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$						
k_{rN}	:	-68,651	-68,651	-68,651	-47,974	-17,528	-17,528	-17,528	-68,651	-68,651	-47,974	-47,974	
b_{rN}	:	-0,04	-0,04	-0,01	-0,04	-0,04	-0,01	0,03	-0,04	-0,01	-0,04	-0,01	
Station		1594	106,2	113,3	105,9	112,6	112,1	108,2	108,0	116,0	107,9	115,9	108,9
		1552	1190,4	1356,9	1188,6	1304,3	1203,8	1159,0	1189,3	1455,3	1157,5	1447,5	1236,7
		1556	1139,3	1307,5	1134,7	1256,9	1154,9	1103,1	1135,5	1398,2	1101,3	1390,7	1188,8
		1567	309,7	349,2	310,3	342,4	320,2	309,7	310,2	369,0	310,4	366,6	331,6
		1009	1060,5	1207,0	1061,4	1144,8	1060,6	1061,7	1061,3	1306,7	1060,6	1298,5	1093,0
		991	1234,2	1336,2	1235,1	1275,5	1234,2	1235,2	1235,0	1464,3	1234,3	1455,0	1234,5
		709	578,6	1522,5	612,2	1423,6	781,5	519,1	595,8	1693,3	688,4	1675,3	1303,5
		1379	922,3	1558,3	941,4	1403,4	779,1	820,8	940,7	1811,3	779,3	1786,6	1225,7
		1377	723,3	1464,0	749,1	1314,1	619,0	581,5	743,4	1695,1	533,5	1671,0	1136,0
		1184	574,3	1074,0	593,5	1007,3	643,7	563,4	584,5	1202,1	609,1	1186,9	919,1
		773	982,8	1512,1	996,5	1408,5	1021,5	982,1	988,1	1677,8	993,5	1665,0	1296,7
		808	1118,1	1356,1	1121,9	1319,1	1163,6	1122,4	1119,7	1444,7	1148,1	1435,0	1282,7
		779	58,3	237,3	53,0	217,3	151,8	20,5	54,7	277,1	108,3	273,1	182,2
		105	112,0	163,1	113,8	154,9	127,1	112,2	113,7	170,5	125,0	169,8	144,7
		106	112,0	163,1	113,8	154,9	127,1	112,2	113,6	170,5	125,0	169,8	144,7
		164	413,3	454,2	410,1	442,0	425,3	407,7	410,5	505,8	424,8	503,2	434,4
		271	118,1	157,9	119,0	148,3	129,7	112,9	119,4	170,6	128,7	169,5	140,5
		23	386,2	984,5	375,4	799,8	248,6	368,3	388,7	1111,2	954,5	1096,7	963,5
		56	0,0	303,5	0,0	210,7	0,0	0,0	0,0	418,4	294,0	403,9	296,7
		80	0,0	305,4	0,0	208,3	0,0	0,0	0,0	428,8	295,9	413,4	298,5
		66	0,0	1137,1	0,0	840,4	0,0	0,0	0,0	1348,6	1109,8	1323,5	1118,6
		65	0,0	1137,1	0,0	840,4	0,0	0,0	0,0	1348,6	1109,8	1323,5	1118,6
		634	40,4	49,2	41,3	48,4	46,8	40,3	41,3	53,1	46,7	52,6	48,0
		737	0,0	1,8	0,0	1,5	0,9	0,5	0,0	2,3	0,8	2,2	1,2
		885	181,3	196,8	183,3	193,5	185,1	173,3	182,9	210,5	184,5	209,0	191,3

Tabelle F.6: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Respiration ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$). Im Tabellenkopf ist angegeben, wie die Parameter $M_{rN,Ref}$ (s^{-1}), k_{rN} (gC gN^{-1}) und b_{rN} (gN gC^{-1}) aus den Gleichungen 4.5 und 4.6 variiert wurden.

	$M_{rN,Ref}$	k_{rN}	b_{rN}
	$2,512 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$	$2,512 \cdot 10^{-4}$
	-17,528	-17,528	-17,528
	-0,04	-0,01	0,03
Station			
1594	115,7	114,4	109,3
1552	1427,3	1373,6	1157,9
1556	1371,7	1322,3	1101,8
1567	361,2	351,2	310,1
1009	1277,6	1217,3	1061,5
991	1430,3	1349,2	1235,3
709	1632,0	1537,4	485,7
1379	1729,7	1584,7	792,9
1377	1615,0	1487,6	543,8
1184	1151,8	1083,9	561,9
773	1630,1	1529,3	981,6
808	1410,2	1363,1	1119,6
779	264,2	243,3	89,8
105	168,0	164,1	120,1
106	168,0	164,1	120,1
164	491,8	457,1	418,2
271	167,1	159,4	124,8
23	1052,2	974,8	269,5
56	357,2	300,2	0,0
80	363,1	302,0	0,0
66	1240,3	1128,9	0,0
65	1240,3	1128,9	0,0
634	51,2	49,1	44,6
737	2,0	1,7	0,8
885	204,7	197,1	179,6

Tabelle F.7: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$). Im Tabellenkopf sind die Werte für Steigung m und y -Achsenabschnitt o aus den Gleichungen 2.6 (J_{max}) und 2.7 (V_{cmax}) angegeben.

	$V_{cmax} o$	$V_{cmax} m$	$J_{max} o$	$J_{max} m$
	-0,1	0,03	-0,07	0,06
	-0,1	0,04	0,16	0,06
	-0,09	0,06	0,35	0,1
	-0,19	0,02	-0,89	0,06
	-0,07	0,03	0,13	0,06
	-0,05	0,03	-0,1	0,07
	-0,47	0,03	-0,89	0,06
	-0,06	0,03	-0,13	0,06
Station				
1594	152,1	207,6	282,5	29,4
1552	1090,3	1374,8	1685,0	11,3
1556	1038,4	1313,5	1614,3	8,3
1567	278,5	385,3	524,6	0,0
1009	898,7	1296,0	1853,3	0,0
991	1060,0	1482,0	2064,2	0,0
709	486,1	835,1	1224,6	0,0
1379	836,4	1047,1	1197,3	0,0
1377	651,2	832,8	956,6	0,0
1184	485,4	762,4	1068,1	0,0
773	836,6	1247,7	1739,2	0,0
808	1014,1	1291,5	1637,3	49,1
779	23,6	73,0	141,3	0,0
105	101,5	128,7	158,2	0,6
106	101,5	128,7	158,2	0,6
164	373,3	454,7	545,3	34,3
271	105,3	132,2	161,5	4,6
23	216,6	423,5	687,0	0,0
56	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,0	0,0	0,0
634	35,5	48,0	63,5	0,0
737	0,0	0,0	0,0	0,0
885	158,3	214,6	286,0	0,0

Tabelle F.8: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Variierung der Stickstoffabhängigkeit der Photosynthese ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$). Im Tabellenkopf sind die Werte für Steigung m und y -Achsenabschnitt o aus den Gleichungen 2.6 (J_{max}) und 2.7 (V_{cmax}) angegeben.

	$V_{cmax} o$	$V_{cmax} m$	$J_{max} o$	$J_{max} m$		
	-0,13	0,01	0,13	-0,1	0,59	
	0,04	0,02	0,02	0,05	0,04	
	0,16	0,1	0,43	0,39	1,14	
	0,06	0,05	0,03	0,1	0,04	
	1594	192,8	158,6	221,2	248,4	367,4
	1552	1327,9	987,8	1258,5	1556,9	1845,6
	1556	1268,1	939,6	1201,1	1489,9	1770,9
	1567	366,8	242,4	340,1	462,5	622,9
	1009	1230,1	746,4	1084,0	1599,9	2234,9
	991	1412,4	896,5	1256,8	1801,0	2453,0
	709	778,9	353,8	650,8	1068,1	1400,0
	1379	1020,2	726,0	948,4	1145,1	1238,8
	1377	808,9	554,6	747,2	916,4	985,5
	1184	719,4	370,4	619,9	942,6	1208,7
	773	1182,5	669,4	1032,9	1529,8	2002,1
	808	1247,3	900,4	1146,6	1486,2	1845,1
	779	64,1	9,0	51,5	111,0	190,7
	105	124,5	89,6	114,9	145,9	173,9
	106	124,5	89,6	114,9	145,9	173,9
	164	442,2	337,8	413,2	507,1	594,7
	271	128,1	93,7	118,6	149,2	177,1
	23	396,5	117,0	244,5	572,7	789,5
	56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	634	46,0	30,5	41,5	56,8	72,4
	737	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	885	205,8	135,1	185,5	254,1	331,5

Tabelle F.9: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Variierung der Temperaturabhängigkeit und der Verringerung der Photosynthese bei gefüllten Kohlenhydratspeichern ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$). Im Tabellenkopf ist angegeben, wie der jeweilige Temperaturparameter variiert wurde.

Station	Respiration	Respiration	Photosynthese	Photosynthese	$T_{Ref} + 5\%$	$T_{Ref} + 5\%$	Verringerung von A_{ph}	
	$Q_{10} + 0,5$	$Q_{10} - 0,5$	$T_{opt} + 30\%$	$T_{opt} - 30\%$			ab 50 % Füllstand	ab 75 % Füllstand
1594	107,5	98,9	107,4	106,3	109,0	92,0	103,6	107,4
1552	1237,1	1068,4	1179,8	1170,4	1393,4	773,2	1177,8	1179,3
1556	1185,9	1014,1	1125,0	1116,7	1349,5	716,0	1123,8	1124,4
1567	328,8	258,8	311,9	309,4	387,5	189,3	308,2	310,5
1009	1120,3	922,2	1062,3	1030,9	1138,9	811,3	1061,3	1061,3
991	1346,9	1010,9	1233,9	1246,5	1269,4	1026,8	1234,7	1234,7
709	716,6	553,3	636,0	592,1	1383,0	35,9	632,7	632,7
1379	1323,9	371,6	934,7	963,7	1538,0	222,1	935,1	935,1
1377	1072,6	257,8	736,6	757,4	1410,8	47,0	736,6	736,6
1184	741,8	400,6	607,3	602,7	1054,1	113,9	605,3	605,3
773	1072,0	878,1	1011,4	966,0	1371,8	506,8	1010,2	1010,2
808	1088,3	1126,0	1138,6	1042,9	1416,4	734,7	1104,0	1132,3
779	67,7	2,2	40,1	45,9	121,1	0,0	37,5	37,5
105	100,1	127,7	116,3	62,2	160,5	54,7	113,3	113,3
106	100,0	127,7	116,3	62,2	160,5	54,7	113,3	113,3
164	423,5	383,3	410,1	412,8	479,2	301,3	406,5	408,6
271	113,2	119,8	118,6	87,8	159,4	70,0	116,7	116,7
23	435,2	284,5	374,7	333,8	1054,3	0,0	372,2	372,2
56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0	393,0	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,0	0,0	0,0	393,0	0,0	0,0	0,0
634	46,5	29,5	40,5	52,3	40,9	36,4	40,1	40,6
737	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
885	195,3	146,9	183,3	184,2	191,7	152,5	181,3	182,8

Tabelle F.10: Ergebnisse (NPP) der Modellläufe zur Menge lebenden Gewebes im Holz und zum respiratorischen Grundumsatz ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$). Im Tabellenkopf ist die jeweiligen Änderung angegeben. \bar{T}_{ann} – mittlere Jahrestemperatur.

Station	verbleibendes Lebendgewebe 80 %	verbleibendes Lebendgewebe 60 %	Grundumsatz- Multiplikator $\frac{1}{2,0}$	Grundumsatz- Multiplikator $\frac{1}{1,75}$	Grundumsatz- Multiplikator $\frac{1}{1,5}$	Grundumsatz- Multiplikator $\frac{1}{0,75}$	Grundumsatz- Multiplikator $\frac{1}{0,5}$
1594	110,0	118,7	139,3	133,6	126,8	85,7	41,6
1552	1074,3	1280,4	1634,3	1564,2	1474,7	902,4	366,5
1556	1020,5	1225,0	1579,3	1506,7	1417,6	850,6	325,9
1567	270,9	348,8	475,8	451,6	419,5	201,9	63,7
1009	915,9	1144,3	1496,5	1434,4	1351,9	770,4	203,0
991	1087,5	1318,3	1673,4	1611,1	1527,7	941,7	361,2
709	359,6	847,7	2169,5	1849,4	1485,1	189,0	0,0
1379	613,1	1136,5	2170,3	1932,5	1677,1	428,9	0,0
1377	435,8	944,1	2073,0	1784,3	1497,9	296,3	0,0
1184	371,5	753,2	1493,1	1330,3	1156,0	208,1	0,0
773	754,9	1164,3	1894,5	1738,6	1570,1	495,9	71,3
808	1146,1	1240,9	1600,4	1515,6	1422,2	827,0	458,5
779	25,3	57,2	293,7	259,0	197,9	5,2	0,0
105	116,2	127,0	188,9	177,8	163,2	78,2	16,2
106	116,2	127,0	188,9	177,7	163,2	78,2	16,2
164	415,2	439,5	544,6	525,3	498,2	339,0	207,1
271	120,2	133,2	191,2	180,5	165,6	87,2	37,5
23	340,1	792,9	1694,0	1448,8	1107,5	41,0	0,0
56	0,0	0,0	1274,7	925,9	1,7	0,0	0,0
80	0,0	0,0	1585,3	1153,7	0,0	0,0	0,0
66	0,0	19,0	2716,1	2038,8	329,2	0,0	0,0
65	0,0	19,0	2716,1	2038,8	329,2	0,0	0,0
634	41,9	45,2	61,2	58,8	55,0	33,7	18,0
737	0,0	0,0	2,9	2,4	1,9	0,0	0,0
885	190,1	210,6	259,6	247,2	228,8	148,1	82,8

Anhang G

Steady state Lösungen der Bilanzgleichung für c_i

Zur Vergrößerung der Schrittweite von CABIN sind steady state Lösungen für die Berechnung des c_i erstellt worden. Da das Photosynthesemodell fünf verschiedene Situationen im Bestand darstellen kann (Abschnitt 3.1.9), wurden auch fünf steady state Lösungen benötigt. Für jeden der fünf Fälle wurde Gleichung 3.2 null gesetzt und nach c_i aufgelöst. Abgesehen von Fall drei lässt sich für jeden Fall eine quadratische Lösung angeben. Für Fall drei wird die Nullstelle über das Newton-Raphson Verfahren bestimmt.

G.1 Allgemeine Lösung

Eine quadratische Gleichung der Form

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (\text{G.1})$$

lässt sich auf folgende Weise lösen:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{G.2})$$

Die Gleichungen für a , b und c für die verschiedenen Fälle werden in den nächsten Abschnitten angegeben.

G.2 Die fünf Fälle des Photosynthesemodells

G.2.1 Erster Fall

Im ersten Fall ist der gesamte Bestand lichtgesättigt und das CO_2 -Angebot limitiert überall.

$$a = -\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \quad (\text{G.3})$$

$$b = \frac{g_s \cdot 10^6}{1,56}(c_a + k_x) - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2}(c_a - k_x) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} - V_{cmax} \quad (\text{G.4})$$

$$c = k_x \left[c_a \left(\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \right) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} \right] + V_{cmax} \cdot \Gamma_* \quad (\text{G.5})$$

Der zusammengefasste kinetische Parameter k_x der Rubisco berechnet sich nach:

$$k_x = k_c \left(1 - \frac{o_i}{k_o} \right) \quad (\text{G.6})$$

G.2.2 Zweiter Fall

Im zweiten Fall ist der gesamte Bestand lichtgesättigt und die Elektronentransportkapazität limitiert überall.

$$a = -\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \quad (\text{G.7})$$

$$b = \frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} (c_a - 2\Gamma_*) - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} (c_a - 2\Gamma_*) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} - \frac{J_{max}}{a} \quad (\text{G.8})$$

$$c = \Gamma_* \left[\frac{J_{max}}{a} + 2 \left(R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} + c_a \left(\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \right) \right) \right] \quad (\text{G.9})$$

G.2.3 Dritter Fall

Im dritten Fall ist der obere Teil des Bestandes lichtgesättigt, darunter limitiert das CO_2 -Angebot.

In diesem Fall werden die Nullstellen über das Newton-Raphson Verfahren bestimmt:

$$c_{i,n} = c_{i,n-1} \frac{f(c_{i,n-1})}{f'(c_{i,n-1})} \quad (\text{G.10})$$

Durch Iteration wird die Nullstelle approximiert, wobei hier $f(c_i)$ für die Differentialgleichung für c_i (Gleichung 3.2) steht, in die A_{ph} in der für den dritten Fall benötigten Formulierung eingesetzt wurde:

$$\begin{aligned} f(c_i) = & \frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} (c_a - c_i) - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} (c_a + c_i) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} \\ & + (c_i - \Gamma_*) \left[\frac{V_{cmax}}{N_{ha} \cdot (c_i + k_x)} \cdot \frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} \right. \\ & \cdot \left(\ln \left(\frac{V_{cmax}}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{c_i + 2\Gamma_*}{c_i + k_x} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \right) - 1 \right) \\ & \left. + \frac{1}{c_i + k_x} \left((1-r) \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \cdot \exp \left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} - N_{ha} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{G.11})$$

Die Ableitung $f'(c_i)$ hat folgende Form:

$$\begin{aligned} f'(c_i) = & -\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \\ & + \frac{V_{cmax}}{N_{ha} \cdot (c_i + k_x)} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \\ & \cdot \left[\frac{k_x + \Gamma_*}{c_i + k_x} \cdot \ln \left(\frac{V_{cmax}}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{c_i + 2\Gamma_*}{c_i + k_x} \right) \right. \\ & \left. - 3 \frac{\Gamma_*}{c_i + 2\Gamma_*} \right] \\ & + 3\Gamma_* \frac{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0}{(c_i + 2\Gamma_*)^2} \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \cdot \exp \left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,n}}{LAI} \cdot N_{ha} \right) \end{aligned} \quad (\text{G.12})$$

Die Iteration wurde 30 Mal durchgeführt, um sicherzustellen, dass c_i ausreichend konvergiert ist.

G.2.4 Vierter Fall

Im vierten Fall ist der obere Teil des Bestandes lichtgesättigt, darunter limitiert die Elektronentransportkapazität.

$$a = -\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \quad (G.13)$$

$$\begin{aligned} b = & \frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} (c_a - 2\Gamma_*) - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} (c_a - 2\Gamma_*) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} \\ & + \frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \cdot \frac{1}{N_{ha}} \cdot \ln \left(\frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{1}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \right) \\ & - (1-r) \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \cdot \left(\frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{1}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \right. \\ & \quad \left. - \exp \left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} \cdot N_{ha} \right) \right) \end{aligned} \quad (G.14)$$

$$\begin{aligned} c = & \Gamma_* \left[-\frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \cdot \frac{1}{N_{ha}} \right. \\ & \cdot \ln \left(\frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{1}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} \right) \\ & + (1-r) \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \\ & \cdot \left(\frac{J_{max}}{a} \cdot \frac{C_{ha}}{N_{ha} \cdot 0,45} \cdot \frac{1}{(1-r) \cdot \alpha \cdot I_0} \cdot \frac{LAI}{k_a \cdot k_{Chl,N}} - \exp \left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} \cdot N_{ha} \right) \right) \\ & \left. + 2 \left(R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} + c_a \left(\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (G.15)$$

G.2.5 Fünfter Fall

Im fünften Fall ist der gesamte Bestand lichtlimitiert.

$$a = -\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \quad (G.16)$$

$$b = \frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} (c_a - 2\Gamma_*) - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} (c_a + 2\Gamma_*) + R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} - (1-r) \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \left(1 - \exp\left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} \cdot N_{ha}\right) \right) \quad (G.17)$$

$$c = \Gamma_* \left[2 \left(R_{ha} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{12,011} + c_a \left(\frac{g_s \cdot 10^6}{1,56} - \frac{e_{mol} \cdot 10^6}{2} \right) \right) + (1-r) \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \frac{0,45}{C_{ha}} \left(1 - \exp\left(-\frac{k_a \cdot k_{Chl,N}}{LAI} \cdot N_{ha}\right) \right) \right] \quad (G.18)$$

G.2.6 Blattflächenindex LAI

Der für die Berechnung des c_i im dritten bis fünften Fall benötigte Blattflächenindex (LAI , leaf area index, $m_{leaf}^2 m^{-2}$) wird aus der oberirdischen krautigen Phytomasse C_{ha} und der spezifischen Blattfläche SLA ($m_{leaf}^2 gC^{-1}$) berechnet:

$$LAI = C_{ha} \cdot SLA \quad (G.19)$$

Ebenso wie die Phytomassen wird LAI täglich interpoliert. Die Daten zur SLA sind vegetationspezifisch und entstammen GIWACOM.

Anhang H

Mittlere Jahrestemperaturen

In diesem Anhang werden Spannen mittlerer Jahrestemperaturen für die Vegetationskarte nach Schmithüsen (1976), wie sie in NCIM und GIWACOM verwendet wird, vorgestellt. Mittlere Jahrestemperaturen wurden für jedes Gitterelement des in NCIM und GIWACOM verwendeten 0,5°-Gitters dem globalen Datensatz von Leemans und Cramer (1991) entnommen und den jeweiligen für das Gitterelement angegebenen Schmithüsen-Vegetationstypen zugeordnet. Für jeden Vegetationstyp wurden die geringsten und höchsten mittleren Jahrestemperaturen bestimmt. Die Daten sind in Tabelle H.1 aufgelistet.

Die Spannen der für einen Vegetationstyp auftretenden mittleren Jahrestemperaturen reicht von 2,9°C bei „Tropischer Überschwemmungsauewald (Várzea)“ (24,4°C bis 27,3°C) bis 37,3°C bei „Boreales und subpolares offenes Koniferen-Baumgehölz“ (-12,7°C bis 24,6°C). Für diese Angaben wurden nur Vegetationstypen ausgewertet, die auf mehr als 100 Gitterelementen vorkommen.

Tabelle H.1: Vegetationstypen nach Schmithüsen (1976) und Spannen mittlerer Jahrestemperaturen nach Leemans und Cramer (1991). Angegeben ist die ID des Vegetationstyps, wie sie in NCIM und GIWACOM verwendet wird, der Name des Vegetationstyps nach Schmithüsen (1976), die Anzahl Gitterelemente im globalen Gitter von NCIM und GIWACOM, auf denen der Vegetationstyp vorkommt (\mathcal{N}) sowie die geringste ($\overline{T}_{ann,min}$) und höchste ($\overline{T}_{ann,max}$) diesen Gitterelementen nach Leemans und Cramer (1991) zugeordneten mittleren Jahrestemperaturen und die Differenz dieser Werte ($\Delta\overline{T}_{ann}$). Alle Angaben in °C.

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
1	tropical evergreen lowland rain forest	3213	16,0	27,8	11,8
2	tropical evergreen riverbank forest	19	24,1	27,0	2,9
3	tropical floodplain forest (Varzea)	192	24,4	27,3	2,9
4	tropical inundation swamp (Igapo) and bog forest	222	22,3	28,0	5,7
5	mangrove	303	15,0	28,4	13,4
6	tropical mountain rain forest	501	1,4	27,3	25,9
7	tropical evergreen cloud forest	120	-4,8	23,7	28,5
8	tropical evergreen seasonal rain forest	320	15,6	27,9	12,3
9	tropical semi-deciduous lowland rain forest	963	13,5	28,5	15,0

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von Tabelle H.1

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
10	tropical semi-deciduous mountain forest	55	11,8	24,9	13,1
11	subtropical evergreen rain forest	136	15,3	24,0	8,7
13	subtropical semi-deciduous rain forest	64	17,5	23,3	5,8
14	temperate evergreen rain forest	97	5,2	15,3	10,1
15	temperate coniferous rain forest	160	-6,7	11,6	18,3
16	temperate evergreen broadleaved and conifer mixed forest	6	-3,2	11,0	14,2
17	temperate evergreen broadleaved forest	78	3,6	13,2	9,6
18	extra-boreal mountain coniferous forest	199	-2,8	23,2	26,0
19	Araucaria forest	88	6,8	21,3	14,5
20	boreal evergreen coniferous forest	3026	-11,4	16,1	27,5
21	boreal evergreen coniferous forest with cold-deciduous broadleaved trees	323	-15,5	5,2	20,7
24	boreal evergreen mountain coniferous forest	1690	-13,8	14,9	28,7
25	boreal and subpolar open coniferous woodland	1670	-12,7	24,6	37,3
26	peat-moss raised bog with coniferous trees	272	-12,4	13,1	25,5
27	laurel forest	349	8,1	21,7	13,6
28	laurel mountain forest	220	6,2	26,1	19,9
29	laurel forest with conifers and cold-deciduous broadleaved trees	3	7,8	9,8	2,0
30	laurel forest with coniferous trees	202	9,5	24,0	14,5
31	sclerophyllous forest	240	4,1	20,0	15,9
32	open sclerophyllous woodland	414	9,3	22,8	13,5
33	tropical evergreen oak-pine forest	126	12,3	24,5	12,2
34	coniferous dry forest	175	-1,1	20,4	21,5
35	open coniferous dry woodland	188	0,6	19,1	18,5
36	open coniferous dry woodland with evergreen broadleaved trees	41	-3,5	19,3	22,8
37	open coniferous dry woodland with cold-deciduous broadleaved trees	228	-3,8	16,3	20,1
39	open mop-headed tree formation	30	25,3	27,4	2,1
41	tropical evergreen seasonal dry forest	42	25,4	29,7	4,3
42	open evergreen savanna woodland	328	15,2	27,9	12,7
44	open sclero-xeromorphic woodland	79	23,8	27,3	3,5
45	open evergreen thorn-tree woodlands	44	18,0	27,5	9,5

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von Tabelle H.1

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
46	thorn-tree and succulent forest	354	14,0	30,8	16,8
47	open stem-succulent stands	8	20,3	24,3	4,0
48	tropical deciduous moist forest	549	-2,7	27,9	30,6
50	tropical deciduous moist mountain forest	60	15,6	28,1	12,5
51	tropical deciduous dry forest	733	11,3	29,7	18,4
52	tropical deciduous dry forest with evergreen understory	1090	17,3	27,7	10,4
53	large pinnate-leafed deciduous dry forest	172	19,0	25,8	6,8
54	small-leafed deciduous dry forests with umbrella trees	1	15,2	15,2	0,0
55	Campo cerrado	901	17,7	28,0	10,3
56	Campo cerrado with deciduous eucalypts	27	25,8	27,9	2,1
57	open deciduous small-leafed	567	16,6	29,7	13,1
58	open deciduous thorn-tree woodland	87	13,5	18,8	5,3
59	cold-deciduous mesophytic broad-leafed forest	1604	-2,2	21,7	23,9
60	cold-deciduous broadleafed forest with evergreen broadleafed trees	283	6,2	17,6	11,4
61	submediterranean cold-deciduous broadleafed forest	189	0,0	17,4	17,4
62	cold-deciduous broadleafed forest with evergreen coniferous trees	1275	-2,4	20,3	22,7
63	mountain cold-deciduous mesophytic broadleafed forest	390	-1,1	17,6	18,7
64	mountain cold-deciduous broadleafed forest with coniferous trees	253	-2,6	15,3	17,9
66	open cold-deciduous broadleafed woodland	212	-4,3	18,7	23,0
67	subtropical drought-deciduous dry forest	45	8,6	20,7	12,1
68	cold-deciduous tree steppe	844	-2,1	22,2	24,3
69	boreal cold-deciduous coniferous forest	2805	-17,7	-0,2	17,5
70	open cold-deciduous coniferous woodland	1196	-18,1	-3,6	14,5
71	cold-deciduous mixed coniferous and broadleafed forest	66	-4,4	1,2	5,6
72	subtropical cold-deciduous coniferous swamp-forest	64	15,0	21,8	6,8
73	cold-deciduous river-meadow forest	327	-3,9	17,5	21,4

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von Tabelle H.1

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
74	cold-deciduous swamp and bog broadleaved forest	36	6,8	9,8	3,0
76	Paramo laurel woodland	107	-8,4	19,9	28,3
77	coniferous shrub formation	54	-13,3	2,3	15,6
78	coniferous shrub formation with deciduous shrubs	159	-11,2	21,3	32,5
80	sclerophyllous shrub formation	290	8,3	25,6	17,3
81	open sclerophyllous shrub formation	24	-1,7	24,6	26,3
82	evergreen xeromorphic shrub formation	178	14,6	28,7	14,1
83	mulga scrub	280	15,2	26,2	11,0
84	succulent shrub formation	55	6,1	28,1	22,0
85	deciduous shrub formation	4	14,4	15,2	0,8
86	tropical-subtropical deciduous scrub	13	6,4	23,3	16,9
87	cold-deciduous river meadow scrub	409	-13,9	11,2	25,1
88	subpolar pasture and cold-deciduous scrub	241	-10,6	5,7	16,3
89	xeromorphic scrub formation	159	3,1	24,6	21,5
90	drought-deciduous and part evergreen thorn bush formation	528	3,8	26,0	22,2
91	La Serena shrub formation	3	14,0	14,7	0,7
92	open halophytic shrub formation	51	6,9	19,2	12,3
93	moist savanna	768	14,4	27,9	13,5
96	inundation savanna	290	19,6	28,5	8,9
97	dry savanna	1292	12,7	29,3	16,6
98	upland dry savanna	154	12,4	27,5	15,1
99	thorn savanna	1748	9,1	29,6	20,5
100	subtropical upland grass steppe	100	10,7	20,0	9,3
101	subtropical littoral steppe	10	20,0	22,7	2,7
102	Pampa grassland	187	13,2	19,1	5,9
103	prairie and blackearth steppe	505	-1,5	20,9	22,4
104	meadow steppe with cold-deciduous copses	190	-4,2	5,8	10,0
105	steppe with evergreen and deciduous copses	192	-4,4	23,3	27,7
106	transitional steppe	797	0,7	17,5	16,8
107	short grass dry steppe	1222	-10,0	20,4	30,4
108	tussock steppe	49	6,3	17,3	11,0
109	alpine swards	372	-13,4	9,3	22,7
110	mountain steppe	373	-6,2	20,3	26,5
111	mountain vegetation above the tree line	1711	-18,1	18,6	36,7
112	Paramo grassland	18	3,5	20,7	17,2

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von Tabelle H.1

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
113	moist Puna steppe	56	2,7	22,0	19,3
114	Puna dry steppe	92	0,7	13,9	13,2
115	dwarf-shrub dry steppe	248	2,2	12,9	10,7
116	subtropical rain-green bunch-grass dry steppe	296	-8,1	21,3	29,4
117	central Asian bunch-grass dry steppe	242	-8,2	6,7	14,9
118	Artemisia dry steppe	253	1,5	23,2	21,7
119	halophytic forb formation	73	-8,6	5,9	14,5
120	saltings or coastal dune vegetation	219	-5,1	27,5	32,6
122	saltings	4	8,6	9,3	0,7
123	reed swamp	310	1,5	29,3	27,8
125	Everglades	4	22,9	24,2	1,3
126	Paramo heath	33	3,2	21,4	18,2
127	subtropical evergreen heath	23	5,2	18,9	13,7
128	heath of the temperate zone	33	4,8	9,5	4,7
129	bog and evergreen woods of west Patagonia	24	4,6	7,4	2,8
130	peat-moss raised bog	67	-4,4	9,9	14,3
131	tundra bog	101	-12,9	-0,6	12,3
132	lichen and moss tundra	1166	-17,6	4,1	21,7
133	dwarf shrub tundra	2622	-16,5	1,9	18,4
134	meadow tundra	27	-0,4	3,8	4,2
135	subantartic dwarf shrub heath	11	-0,9	6,1	7,0
136	sclerophyllous garrigue	14	11,8	24,3	12,5
137	dwarf palm garrigue	6	15,3	16,7	1,4
138	hard and thorn pillow mountain formation	276	-7,3	23,4	30,7
139	subantartic hard pillow formation	5	2,9	4,5	1,6
140	spinifex semidesert	136	20,1	26,4	6,3
141	tropical-subtropical dwarf shrub semidesert	1660	6,5	30,7	24,2
142	central Asian dwarf shrub semidesert	209	-3,1	11,3	14,4
143	succulent semidesert	30	14,7	24,2	9,5
144	halophytic semidesert	989	-5,7	30,5	36,2
145	subtropical hard polster desert	221	17,1	26,1	9,0
146	shrub desert	2235	1,6	29,5	27,9
147	sand desert	1485	-1,7	29,7	31,4
148	stone desert	347	11,1	30,1	19,0
149	mountain desert of the tropics	157	17,4	27,0	9,6
150	halophytic desert	133	9,8	26,9	17,1
151	succulent desert	23	14,2	18,5	4,3
152	cold desert	1718	-27,0	3,7	30,7
153	oasis vegetation	37	20,1	29,4	9,3

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von Tabelle H.1

ID	Vegetationstyp	\mathcal{N}	$\overline{T}_{ann,min}$	$\overline{T}_{ann,max}$	$\Delta\overline{T}_{ann}$
154	ice region	2714	-27,7	4,8	32,5
162	boreal evergreen coniferous forest with Pinus	794	-5,6	9,2	14,8
163	boreal evergreen mountain coniferous forest with Pinus	48	0,0	7,5	7,5
164	cold-deciduous mesophytic broadleafed forest with Quercus	26	9,7	16,0	6,3
165	sclerophyllous forest with Quercus ilex	164	10,2	18,5	8,3
166	sclerophyllous forest with Quercus suber	8	14,5	18,9	4,4
167	sclerophyllous forest with Olea	28	14,0	18,1	4,1
168	mountain cold-deciduous mesophytic broadleafed forest with Fagus	5	8,8	16,7	7,9
169	cold-deciduous mesophytic broadleafed forest with Carpinus	8	8,4	12,0	3,6
170	extra-boreal mountain coniferous forest with Pinus	3	10,9	11,5	0,6
171	cold-deciduous mesophytic broadleafed forest with Fagus	3	9,5	13,2	3,7

Literaturverzeichnis

- Amthor, J. S., 1984. The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant, Cell and Environment*, **7**, 561–569.
- Amthor, J. S., 1989. *Respiration and Crop Productivity*, Kap. Physiology of Respiration, S. 44–68. Springer-Verlag.
- Amthor, J. S., 2000. The McCree-de Witt-Penning de VVries-Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, **86**, 1–20.
- Asner, G. P., C. A. Wessmann und S. Archer, 1998. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, **8**, 1003–1021.
- Atkin, O. K., D. Bruhn und M. G. Tjoelker, 2005. Response of plant respiration to changes in temperature: mechanisms and consequences of variations in Q_{10} values and acclimation. In H. Lambers und M. Ribas-Carbo (Hg.), *Plant Respiration: from Cell to Ecosystem*, Bd. 18 von *Advances in Photosynthesis and Respiration*, S. 95–135. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Atkin, O. K., J. R. Evans, M. C. Ball, H. Lambers und T. J. Pons, 2000a. Leaf respiration of Snow Gum in the light and dark. Interactions between temperature and irradiance. *Plant Physiology*, **122**, 915–923.
- Atkin, O. K., A. H. Millar, P. Gardeström und D. A. Day, 2000b. Photosynthesis, carbohydrate metabolism and respiration in leaves of higher plants. In R. C. Lee-good, T. D. Sharkey und S. von Caemmerer (Hg.), *Photosynthesis: Physiology and Metabolism*, Bd. 9 von *Advances in Photosynthesis*, S. 153–175. Kluwer Academic Publishers.
- Atkin, O. K. und M. G. Tjoelker, 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *TRENDS in Plant Science*, **8**, 343–351.
- Barbaroux, C., N. Bréda und E. Dufrêne, 2003. Distribution of above-ground and below-ground carbohydrate reserves in adult trees of two contrasting broad-leaved species (*Quercus petraea* and *Fagus sylvatica*). *New Phytologist*, **157**, 605–615.
- Bergh, J. und S. Linder, 1999. Effects of soil warming during spring on photosynthetic recovery in boreal Norway spruce stands. *Global Change Biology*, **5**, 245–253.

- Bernacchi, C. J., E. L. Songsaas, C. Pimentel, A. R. Portis Jr. und S. P. Long, 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and Environment*, **24**, 253–259.
- Berry, J. und O. Björkmann, 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, **31**, 491–543.
- Bolstad, P. V., K. Mitchell und J. M. Vose, 1999. Foliar temperature-respiration response functions for broad-leaved tree species in the southern Appalachians. *Tree Physiology*, **19**, 871–878.
- Bormann, F. H., T. G. Siccama, G. E. Likens und R. H. Whittaker, 1970. The Hubbard Brook Ecosystem study: Composition and dynamics of the tree stratum. *Ecological Monographs*, **40**, 373–388.
- Bouma, T. J., 2005. Understanding plant respiration: separating respiratory components versus a process-based approach. In H. Lambers und M. Ribas-Carbo (Hg.), *Plant Respiration: from Cell to Ecosystem*, Bd. 18 von *Advances in Photosynthesis and Respiration*, S. 177–194. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Brosch, M., 1990. *Untersuchungen zur Bestimmung des Respirationskoeffizienten an nicht photosynthetisch aktiven Stammgeweben von Eschen (Fraxinus excelsior L.)*. Diplomarbeit, Fachbereich Biologie/Chemie der Universität Osnabrück, Arbeitsgruppe Ökologie.
- Bunce, J. A., 2005. Response of respiration of soybean leaves grown at ambient and elevated carbon dioxide concentrations to day-to-day variation in light and temperature under field conditions. *Annals of Botany*, **95**, 1059–1066.
- Burton, A. J., K. S. P. R. W. Ruess, R. L. Hendrick und M. F. Allen, 2002. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, **131**, 559–568.
- Bykova, N. V., O. Keerberg, T. Pärnik, H. Bauwe und P. Gardeström, 2005. Interaction between photorespiration and respiration in transgenic potato plants with antisense reduction in glycine decarboxylase. *Planta*, **222**, 130–140.
- Caldwell, M. M., 1974. Carbon balance and productivity of two cool desert communities dominated by shrubs possessing C₃ and C₄ photosynthesis. In *Proceedings of the 1st international congress of Ecology. The Hague, Netherlands.*, S. 52–56. Centre for Agricultural Publication and Documentation, Wageningen.
- Caldwell, M. M. und L. B. Camp, 1974. Belowground productivity of two cool desert communities. *Oecologia*, **17**, 123–130.
- Campbell, G. S. und J. M. Norman, 1998. *Introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag, New York.
- Canadell, J., R. B. Jackson, J. R. Ehleringer, H. A. Monney, O. E. Sala und E.-D. Schulze, 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, **108**, 583–595.
- Cannell, M. G. R. und J. E. Jackson (Hg.), 1985. *Attributes of trees as crop plants*. Institute of Terrestrial Ecology, Huntingdon, England.

- Cannell, M. G. R. und J. H. M. Thornley, 2000. Modelling the components of plant respiration: some guiding principles. *Annals of Botany*, **85**, 45–54.
- Chapin, F. S., III und W. C. Oechel, 1983. Photosynthesis, respiration, and phosphate absorption by *Carex aquatilis* ecotypes along latitudinal and local environmental gradients. *Ecology*, **64**, 743–751.
- Chapin, F. S., III, E.-D. Schulze und H. A. Mooney, 1990. The ecology and economics of storage in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **21**, 423–447.
- Chapman, E. A. und D. Graham, 1974. The effect of light on the tricarboxylic acid cycle in green leaves. I. Relative rates of the cycle in the dark and in the light. *Plant Physiology*, **53**, 879–885.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson und J. Ni, 2001a. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications*, **11**, 356–370.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, J. Ni und E. A. Holland, 2001b. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing data. *Ecological Applications*, **11**, 371–384.
- Clüsener-Godt, M., 1989. *Statistische Analysen zur Beziehung von Nährelementen in Pflanze und Boden am natürlichen Standort in globaler Hinsicht*. Diplomarbeit, Universität Osnabrück.
- Conroy, J. und P. Hocking, 1993. Nitrogen nutrition of C₃ plants at elevated atmospheric CO₂. *Physiologia Plantarum*, **89**, 570–576.
- Cornet, A., 1981a. Measurement of the aerial herbaceous and net primary production of tree grassland communities in the sahelian zone of Senegal. *Tropical Ecology*, **22**, 257–262.
- Cornet, A., 1981b. Measurement of the aerial herbaceous and net primary production of tree grassland communities in the sahelian zone of Senegal. *Oecologia Plantarum*.
- Cornet, A. und H. Poupon, 1977. Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. *Bulletin de l'Institut Fondamental d'Afrique Noir*, **39**, 241–300.
- Curtis, P. S., C. S. Vogel, K. S. Pregitzer, D. R. Zak und J. A. Teeri, 1995. Interacting effects of soil fertility and atmospheric CO₂ on leaf area growth and carbon gain physiology in *Populus x euramericana* (Dode) Guinier. *New Phytologist*, **129**, 253–263.
- DeAngelis, D. L., R. H. Gardner und H. H. Shygart, 1981. *Dynamic properties of forest ecosystems*, Kap. Productivity of forest ecosystems studies during the IBP: the woodlands data set, S. 567–672. Bd. 23 von Reichle (1981).
- Eamus, D. und L. Prior, 2001. *Advances in Ecological Research*, Bd. 32, Kap. Eco-physiology of Trees of Seasonally Dry Tropics: Comparison among Phenologies, S. 113–197. Academic Press.

- Ellenberg, H. (Hg.), 1971. *Integrated Experimental Ecology – Methods and Results of Ecosystem Research in the German Solling Project*, Bd. 2 von *Ecological Studies*. Springer, Berlin.
- Eppstein, E., 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **50**, 641–664.
- Esser, G., 2007. Nitrogen Carbon Interaction Model NCIM – Documentation: Model Version 3.00. Mitteilungen aus dem Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen, Heft 5.
- Esser, G. und J. Hoffstadt, 2000. Giessen Global Generic Water Conductance Model GIWACOM – Documentation: Model Versions 2.10 and 2.20. Mitteilungen aus dem Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen, Heft 4.
- Esser, G., J. Hoffstadt, F. Mack und U. Wittenberg, 1994. High Resolution Biosphere Model – Documentation of Model Version 3.00.00. Mitteilungen aus dem Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen, Heft 2.
- Evans, J. R., 1989. Partitioning of nitrogen between and within leaves grown under different irradiances. *Australian Journal of Plant Physiology*, **16**, 533–548.
- Evans, J. R. und F. Loreto, 2000. Acquisition and diffusion of CO₂ in higher plant leaves. In R. C. Leegood, T. D. Sharkey und S. von Caemmerer (Hg.), *Photosynthesis: Physiology and Metabolism*, Bd. 9 von *Advances in Photosynthesis*, S. 321–351. Kluwer Academic Publishers.
- Farage, P. K., I. F. McKee und S. P. Long, 1998. Does a low nitrogen supply necessarily lead to acclimation of photosynthesis to elevated CO₂? *Plant Physiology*, **118**, 573–580.
- Farquhar, G. D., S. von Caemmerer und J. A. Berry, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, **149**, 78–90.
- Farrar, J. F. und J. H. H. Williams, 1991. *Compartmentation of plant metabolism in non-photosynthetic tissues*, Kap. Control of the rate of respiration in roots: compartmentation, demand and the supply of substrate, S. 167–188. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fischer, G., M. Shah und H. van Velthuizen, 2002. Climate change and agricultural vulnerability. Special report, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Flexas, J., J. Galmes, M. Ribas-Carbo und H. Medrano, 2005. The effects of water stress on plant respiration. In H. Lambers und M. Ribas-Carbo (Hg.), *Plant Respiration: from Cell to Ecosystem*, Bd. 18 von *Advances in Photosynthesis and Respiration*, S. 85–94. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Forde, B. G., 2000. Nitrate transporters in plants: structure, function and regulation. *Biochimica et Biophysica Acta – Biomembranes*, **1465**, 219–235.
- Friend, A. D., 2001. Modelling canopy CO₂ fluxes: Are 'big-leaf' simplifications justified? *Global Ecology and Biogeography*, **10**, 603–619.

- Friend, A. D., A. K. Stevens, R. G. Knox und M. G. R. Cannell, 1997. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modelling*, **95**, 249–287.
- Geiger, D. R., J. C. Servaites und M. A. Fuchs, 2000. Role of starch in carbon translocation and partitioning at the plant level. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**, 517–582.
- Geiger, M., P. Walch-Liu, C. Engels, J. Harnecker, E.-D. Schulze, F. Ludewig, U. Sonnewald, W.-R. Scheible und M. Stitt, 1998. Enhanced carbon dioxide leads to a modified diurnal rhythm of nitrate reductase activity in older plants, and a large stimulation of nitrate reductase activity and higher levels of amino acids in young tobacco plants. *Plant, Cell and Environment*, **21**, 253–268.
- Gojon, A., L. Dapoigny, L. Lejay, P. Tillard und T. W. Rufty, 1998. Effects of genetic modification of nitrate reductase expression on $^{15}\text{NO}_3^-$ -uptake and reduction in *Nicotiana* plants. *Plant, Cell and Environment*, **21**, 43–53.
- Gong, W.-K., 1982. Leaf litter fall, decomposition and nutrient element release in a lowland dipterocarp forest. *The Malaysian Forester*, **45**, 367–378.
- Goulden, M. L., S. D. Miller, H. R. Da Rocha, M. C. Menton, H. C. De Freitas, A. M. e Silva Figueira und C. A. Dias De Sousa, 2004. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO_2 exchange. *Ecological Applications*, **14**, S42–S54.
- Goverde, M., J. A. Arnone III und A. Erhardt, 2002. Species-specific reactions to elevated CO_2 and nutrient availability in four grass species. *Basic and Applied Ecology*, **3**.
- Grogan, P. und S. Jonasson, 2005. Temperature and substrate controls on intra-annual variation in ecosystem respiration in two subarctic vegetation types. *Global Change Biology*, **11**, 465–475.
- Grogan, P. und S. Jonasson, 2006. Ecosystem CO_2 production during winter in a Swedish subarctic region: The relative importance of climate and vegetation type. *Global Change Biology*, **12**, 1479–1495.
- Heimann, M., C. Weber, J. C. Duinker, A. Körtzinger, L. Mintrop, N. Buchmann, E.-D. Schulze, M. Hein, A. Bondeau, W. Cramer, M. Lindner und G. Esser, 1999. Natürliche Senken und Quellen des atmosphärischen Kohlendioxids: Stand des Wissens und Optionen des Handelns. Report 287, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Hirose, T., 1988. Modelling the relative growth rate as a function of plant nitrogen concentration. *Physiologia Plantarum*, **72**, 185–189.
- Hoch, G. und C. Körner, 2003. The carbon charging of pines at the climatic treeline: a global comparison. *Oecologia*, **135**, 10–21.
- Hoch, G., A. Richter und C. Körner, 2003. Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant, Cell and Environment*, **26**, 1067–1081.
- Hoffstadt, J., 2000. *Ein mechanistisches Stomatamodell für ökologische Fragestellungen*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.

- Höll, W., 1997. *Trees – Contributions to Modern Tree Physiology*, Kap. Storage and Mobilization of Carbohydrates and Lipids, S. 197–211. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Hottel, H. C., 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, **18**, 129–134.
- Hungate, B. A., 1999. Ecosystem response to rising atmospheric CO₂: feedbacks through the nitrogen cycle. In Y. Luo und H. A. Mooney (Hg.), *Carbon Dioxide and Environmental Stress*, S. 265–285. Academic Press.
- Hungate, B. A., P. Dijkstra, D. W. Johnson, C. R. Hinkle und B. G. Drake, 1999. Elevated CO₂ increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in Florida scrub oak. *Global Change Biology*, **5**, 781–789.
- Hutchings, M. J., E. A. John und D. K. Wijesinghe, 2003. Toward understanding the consequences of soil heterogeneity for plant populations and communities. *Ecology*, **84**, 2322–2334.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ivanova, T. L., O. A. Semikhatova, O. S. Judina und G. D. Leina, 1989. The effect of temperature on the respiration of plants from different plant-geographic zones. In O. A. Semikhatova (Hg.), *Ecophysiological investigations of photosynthesis and respiration in plants*, S. 140–166. Nauka Publishing, Nauka.
- Jarvis, P. G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society in London Series B*, **273**, 593–610.
- Kattge, J., 2002. *Zur Bedeutung von Stickstoff für den CO₂ Düngeeffekt*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Kicklighter, D. W., A. Bondeau, A. L. Schloss, J. Kaduk, A. D. McGuire und T. participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison, 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. *Global Change Biology*, **5**, 16–24.
- Kira, T., 1977. *Tropical trees as living systems; IVth Cabot Symposium, Harvard*, Kap. Community architecture and organic matter dynamics in tropical lowland rain forest of Southeast Asia with special reference to Pasoh Forest, West Malaysia, S. 561–590. Cambridge University Press, London.
- Kira, T., 1978. Primary productivity of Pasoh Forest – a synthesis. *Malaysian Nature Journal*, **30**, 291–297.
- Kira, T., H. Ogawa, K. Yoda und K. Ogino, 1967. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. IV. Dry matter production, with special reference to Khao Chong rain forest. *Nature and Life in Southeast Asia*, **5**, 149–174.

- Kira, T. und T. Shidei, 1967. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Japanese Journal of Ecology*, **17**, 70–87.
- Kjaer, E. D., S. Kajornsrichon und E. B. Lauridsen, 1999. Heartwood, calcium and silica content in five provenances of teak (*Tectona grandis* L.). *Silvae Genetica*, **48**, 1–3.
- Knops, J. M. H., K. L. Bradley und D. A. Wedin, 2002. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. *Ecology Letters*, **5**, 454–466.
- Knorr, W., 1997. *Satellite remote sensing and modelling of the global CO₂ exchange of land vegetation: a synthesis study*. Dissertation, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany.
- Knorr, W. und J. Kattge, 2005. Inversion of terrestrial ecosystem model parameter values against eddy covariance measurements by Monte Carlo sampling. *Global Change Biology*, **11**, 1333–1351.
- Körner, C., 1994. *Ecophysiology of Photosynthesis*, Bd. 100 von *Ecological Studies*, Kap. Leaf Diffusive Conductances in the Major Vegetation Types of the Globe, S. 463–490. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Körner, C., 2003. Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology*, **91**, 4–17.
- Körner, C., R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hättenschwiler, S. G. Keel, S. Peláez-Riedl, S. Pepin, R. T. W. Siegwolf und G. Zotz, 2005. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, **309**, 1360–1362.
- Körner, C. und F. Miglietta, 1994. Long term effect of naturally elevated CO₂ on mediterranean grassland and forest trees. *Oecologia*, **99**, 343–351.
- Körner, C. und U. Reinhardt, 1987. Dry matter partitioning and root length/leaf area ratios in herbaceous perennial plants with diverse altitudinal distribution. *Oecologia*, **47**, 411–418.
- Krömer, S., 1995. Respiration during photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **46**, 45–70.
- Kull, O. und B. Kruijt, 1998. Leaf photosynthetic light response: a mechanistic model for scaling photosynthesis to leaves and canopies. *Functional Ecology*, **12**, 767–777.
- Lambers, H., R. K. Szaniawski und R. de Visser, 1983. Respiration for growth, maintenance and ion uptake. an evaluation of concepts, methods, values and their significance. *Physiologia Plantarum*, **58**, 556–563.
- Larcher, W., 1994. *Ökophysiologie der Pflanzen*. Ulmer Stuttgart, 5. Aufl.
- Lavigne, M. B., S. E. Franklin und E. R. Hunt, Jr., 1996. Estimating stem maintenance respiration rates of dissimilar balsam fir stands. *Tree Physiology*, **16**, 687–695.

- Lea, P., 1997. *Plant Biochemistry*, Kap. Primary nitrogen metabolism, S. 273–306. Academic Press, San Diego.
- Lee, T. D., P. B. Reich und P. V. Bolstad, 2005. Acclimation of leaf respiration to temperature is rapid and related to specific leaf area, soluble sugars and leaf nitrogen across three temperate deciduous tree species. *Functional Ecology*, **19**, 640–647.
- Leemans, R. und W. Cramer, 1991. *The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation, and cloudiness on a global terrestrial grid*. IIASA Research Report RR-91-18, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.
- Lieth, H., 1975. Modeling the primary productivity of the world. In Lieth und Whittaker (Hg.), *Primary productivity of the biosphere*, Bd. 14 von *Ecological Studies*, S. 237–283. Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.
- Lieth, H. (Hg.), 1978. *Patterns of Primary Production in the Biosphere*, Bd. 8 von *Benchmark Papers in Ecology*, Kap. Photographs, productivity data, and some environmental parameters from IBP sites, S. 205–223. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania.
- Lin, Y., C. F. Hwang, J. B. Brown und C. L. Cheng, 1994. 5' proximal regions of Arabidopsis nitrate reductase genes direct nitrate induced transcription in transgenic tobacco. *Plant Physiology*, **106**, 477–484.
- Linder, S. und E. Troeng, 1981. The seasonal variation in stem and coarse root respiration of a 20-year-old scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien*, **142**, 125–139.
- Long, S. P., 1985. *Photosynthetic Mechanisms and the Environment*, Kap. Leaf Gas Exchange, S. 453–498. Elsevier Science Publishers.
- Luomala, E.-M., K. Laitinen, S. Kellomäki und E. Vapaavuori, 2003. Variable photosynthetic acclimation in consecutive cohorts of Scots pine needles during 3 years of growth at elevated CO₂ and elevated temperature. *Plant, Cell and Environment*, **26**, 645–660.
- Luscher, A., U. A. Hartwig, D. Suter und J. Nosberger, 2000. Direct evidence that symbiotic N₂ fixation in fertile grassland is an important trait for a strong response of plants to elevated CO₂. *Global Change Biology*, **6**, 655–662.
- Malhi, Y., D. D. Baldocchi und P. G. Jarvis, 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, **22**, 715–740.
- Mälkönen, E., 1975. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots Pine stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, **84**, 1–87.
- Margaris, N. S., 1976. Structure and dynamics in a phryganic (East Mediterranean) ecosystem. *Journal of Biogeography*, **3**, 249–259.
- Marland, G., R. J. Andres, T. A. Boden, C. A. Johnston und A. Brenkert, 1999. *Numeric Data Package (NDP-030): Global, Regional, and National CO₂ Emission Estimates from Fossil Fuel Burning, Cement Production,*

- and Gas Flaring: 1751-2002*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, <http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp030.html>, revised August 2005.
- Marsh, H. V. J., J. M. Galmiche und M. Gibbs, 1965. Effect of light on the tricarboxylic acid cycle in *Scenedesmus*. *Plant Physiology*, **40**, 1913–1922.
- Masarovičová, E., R. Welschen, A. Lux, M. Mikuš und H. Lambers, 2000. The response of the perennial teosinte *zea diploperennis* (Poaceae) to nitrate availability. *Maydica*, **45**, 13–19.
- Matt, P., M. Geiger, P. Walch-Liu, C. Engels, A. Krapp und M. Stitt, 2001. The immediate cause of the diurnal changes of nitrogen metabolism in leaves of nitrate-replete tobacco: a major imbalance between the rate of nitrate uptake and ammonium metabolism during the first part of the light period. *Plant, Cell and Environment*, **24**, 177–190.
- Mayrhofer, S., U. Heizmann, M. Eiblmeier, A. Müller, H. Rennenberg, R. Hampp, J.-P. Schnitzler und J. Kreuzwieser, 2004. Carbon balance in leaves of young poplar trees. *Plant Biology*, **6**, 730–739.
- McGuire, A. D., J. M. Mellilo, D. W. Kicklighter, Y. Pan, X. Xio, J. Helfrich, B. Moore III, C. J. Vorosmarty und A. L. Schloss, 1997. Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: sensitivity to changes in vegetation nitrogen concentration. *Global Biogeochemical Cycles*, **11**, 173–189.
- Medlyn, B. E., F.-W. Badeck, D. G. G. De Pury, C. V. M. Barton, M. Broasmeadow, R. Ceulemans, P. De Angelis, M. Forstreuter, M. E. Jach, S. Kellomäki, E. Laitat, M. Marek, S. Philippot, A. Rey, J. Strassmeyer, K. Laitinen, R. Liozon, B. Portier, P. Roberntz, K. Wang und P. G. Jarvis, 1999. Effects of elevated [CO₂] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *Plant, Cell and Environment*, **22**, 1475–1495.
- Medlyn, B. E., E. Dreyer, D. Ellsworth, M. Forstreuter, P. C. Harley, M. U. F. Kirschbaum, X. Le Roux, P. Montpied, J. Strassmeyer, A. Walcroft, K. Wang und D. Loustau, 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell and Environment*, **25**, 1167–1179.
- Metherell, A. K., L. A. Harding und C. V. C. W. J. Parton, 1993. CENTURY soil organic matter model environment technical documentation agroecosystem version 4.0. Techn. Ber. 4, Great Plains System Research Unit, USDA-ARS, Fort Collins, Colorado.
- Mitchell, T. D., T. R. Carter, P. D. Jones, M. Hulme und M. New, 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Tyndall Working Paper 55, Tyndall Centre, UEA, Norwich, UK.
- Morison, J. I. L., 1987. *Stomatal Function*, Kap. Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂, S. 229–251. Stanford University Press, Stanford.

- Müller, M. J., 1982. *Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science*, Bd. 5 von *Tasks for vegetation sciences*. Dr. W Junk Publishers, The Hague, The Netherlands.
- Nakano, H., S. Muramatsu und T. Mae, 2000. Relationship between the suppression of photosynthesis and starch accumulation in the pod-removed bean. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**, 167–173.
- Newell, E. A., S. S. Mulkey und S. J. Wright, 2002. Seasonal patterns of carbohydrate storage in four tropical tree species. *Oecologia*, **131**, 333–342.
- Noguchi, K., 2005. Effects of light intensity and carbohydrate status on leaf and root respiration. In H. Lambers und M. Ribas-Carbo (Hg.), *Plant Respiration: from Cell to Ecosystem*, Bd. 18 von *Advances in Photosynthesis and Respiration*, S. 63–83. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Ogawa, H., 1978. Litter production and carbon cycling in Pasoh Forest. *Malaysian Nature Journal*, **30**, 367–373.
- Ogawa, H., K. Yoda, T. Kira, K. Ogino, T. Shidei, D. Ratanawongse und C. Apasutaya, 1965. Comparative ecological study on three main types of forest vegetation in Thailand I. Structure and floristic composition. *Nature and life in Southeast Asia*, **4**, 12–54.
- Olsen, C., 1950. The significance of concentration for the rate of ion absorption by higher plants in water culture. *Physiologia Plantarum*, **3**, 152–164.
- Olson, R. J., K. R. Johnson, D. L. Zheng und J. M. O. Scurlock, 2001. Global and regional ecosystem modeling: Databases of model drivers and validation measurements. Techn. Ber. ORNL/TM-2001/196, Oak Ridge National Laboratory.
- Öquist, G. und M. Strand, 1986. Effects of frost hardening on photosynthetic quantum yield, chlorophyll organisation and energy distribution between the two photosystems in scots pine. *Canadian Journal of Botany*, **64**, 748–753.
- Paavilainen, E., 1980. Effect of fertilization on plant biomass and nutrient cycle on a drained dwarf shrub pine swamp. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, **98**, 1–71.
- Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole und D. S. Ojima, 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, **51**, 1173–1179.
- Parton, W. J., J. M. O. Scurlock, D. S. Ojima, T. G. Gilmanov, R. J. Scholes, D. S. Schimel, T. Kirchner, J.-C. Menaut, T. Seastedt, E. Garcia Moya, A. Kamnalrut und J. I. Kinyamario, 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**, 785–809.
- Payne, W. J., 1973. Reduction of nitrogenous oxides by microorganisms. *Bacteriological Reviews*, S. 409–452.

- Pego, J. V., A. J. Kortstee, C. Huijser und S. C. M. Smeekens, 2000. Photosynthesis, sugars and the regulation of gene expression. *Journal of Experimental Botany*, **51**, 407–416.
- Penning de Vries, F. W. T., 1975. The cost of maintenance processes in plant cells. *Annals of Botany*, **39**, 77–92.
- Pettersen, R. C., 1984. The chemical composition of wood. In R. M. Rowell (Hg.), *The chemistry of solid wood*, Bd. 207 von *Advances in chemistry*, S. 57–126. American Chemical Society, Washington. DC.
- Pettersson, R., A. J. S. McDonald und I. Stadenberg, 1993. Response of small birch plants (*Betula oendula* Roth.) to elevated CO₂ and nitrogen supply. *Plant, Cell and Environment*, **16**, 1115–1121.
- Potter, C. S. und S. A. Klooster, 1998. Interannual variability in soil trace gas (CO₂, N₂O, NO) fluxes and analysis of controllers on regional to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, **12**, 621–635.
- Potter, C. S., J. T. Randerson, C. B. Field, P. A. Matson, P. M. Vitousek, H. A. Mooney und S. A. Klooster, 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**, 811–841.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery, 1992a. *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, Kap. B7. Random Numbers, S. 1141–1166. Cambridge University Press, 2. Aufl.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery, 1992b. *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, Kap. 15.4 General Linear Least Squares, S. 665–674. Cambridge University Press, 2. Aufl.
- Quispel, A. (Hg.), 1974. *The biology of nitrogen fixation*. North-Holland Pub Co., Amsterdam, Oxford, New York.
- Raven, J. A., 1983. The transport and function of silicon in plants. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, **58**, 179–207.
- Reich, P. B., D. S. Ellsworth und M. B. Walters, 1998a. Leaf structure (specific leaf area) modulates photosynthesis-nitrogen relations: evidence from within and across species and functional types. *Functional Ecology*, **12**, 948–958.
- Reich, P. B., D. S. Ellsworth, M. B. Walters, J. M. Vose, C. Gresham, J. C. Volin und W. D. Bowman, 1999. Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. *Ecology*, **80**, 1955–1969.
- Reich, P. B., B. D. Kloeppel, D. S. Ellsworth und M. B. Walters, 1995. Different photosynthesis-nitrogen relationships in deciduous hardwood and evergreen tree species. *Oecologia*, **104**, 24–30.
- Reich, P. B., J. Oleksyn und M. G. Tjoelker, 1996. Needle respiration and nitrogen concentration in Scots Pine populations from a broad latitudinal range: a common garden test with field-grown trees. *Functional Ecology*, **10**, 786–776.

- Reich, P. B., M. G. Tjoelker, J.-L. Machado und J. Oleksyn, 2006. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. *Nature*, **439**, 457–461.
- Reich, P. B., M. B. Walters und D. S. Ellsworth, 1992. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecological Monographs*, **62**, 365–392.
- Reich, P. B., M. B. Walters, D. S. Ellsworth, J. M. Vose, J. C. Volin, C. Gresham und W. D. Bowman, 1998b. Relationship of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional types. *Oecologia*, **114**, 471–482.
- Reich, P. B., M. B. Walters, M. G. Tjoelker, D. Vanderklein und C. Buschena, 1998c. Photosynthesis and respiration rates depend on leaf and root morphology and nitrogen concentration in nine boreal tree species differing in relative growth rate. *Functional Ecology*, **12**, 395–408.
- Reichle, D. E. (Hg.), 1981. *Dynamic properties of forest ecosystems*, Bd. 23 von *International Biological Programme*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- Richards, P. W., 1978. Pasoh in perspective. *The Malayan Nature Journal*, **30**, 145–148.
- Robinson, D., 1986. Compensatory changes in the partitioning of dry matter in relation to nitrogen uptake and optimal variations in growth. *Annals of Botany*, **58**, 841–848.
- Rodin, L. E. und N. I. Bazilevich, 1967. *Production and Mineral Cycling in Terrestrial Vegetation*. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell und D. W. Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *Third ERTS-1 Symposium*, Bd. 1, S. 309–317. NASA SP-351, NASA, Washington, DC.
- Runge, M., 1973. *Energieumsätze in den Biozönosen terrestrischer Ökosysteme*, Bd. 4 von *Scripta Geobotanicae*. Verlag Erich Goltze KG, Göttingen.
- Running, S. W. und J. C. Coughlan, 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, **42**, 125–154.
- Running, S. W. und E. R. Hunt, 1993. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, Kap. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models, S. 141–158. Academic Press, San Diego, CA.
- Ryan, M. G., 1990. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. *Canadian Journal of Forest Research*, **20**, 48–57.
- Ryan, M. G., 1991a. Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, **1**, 157–167.

- Ryan, M. G., 1991b. A simple method for estimating carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. *Tree Physiology*, **9**, 255–266.
- Ryan, M. G., 1995. Foliar maintenance respiration of subalpine and boreal trees and shrubs in relation to nitrogen content. *Plant, Cell and Environment*, **18**, 765–772.
- Ryan, M. G., R. M. Hubbard, S. Pongracic, R. J. Raison und R. E. McMurtrie, 1996. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in pinus radiata in relation to nitrogen status. *Tree Physiology*, **16**, 333–343.
- Scheible, W., A. Gonzales-Fontes, M. Laurere, B. Müller-Röber, M. Caboche und M. Stitt, 1997a. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco leaves. *Plant Cell*, **9**, 783–798.
- Scheible, W., M. Lauerer, E.-D. Schulze, M. Caboche und M. Stitt, 1997b. Accumulation of nitrate in the shoot acts as a signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. *Plant Journal*, **11**, 671–691.
- Schmithüsen, J., 1976. *Atlas zur Biogeographie*, Bd. 3 von *Meyers großer physischer Weltatlas*. Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich.
- Schortemeyer, M., O. Atkin, N. McFarlane und J. Evans, 1999. The impact of elevated CO₂ and nitrate supply on growth, biomass allocation, nitrogen partitioning and N₂ fixation of *Acacia melanoxylon*. *Australian Journal of Plant Physiology*, **26**, 737–747.
- Schulze, E.-D. (Hg.), 2000. *Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems*, Bd. 142 von *Ecological Studies*. Springer, Berlin.
- Seekatz, B., 2006. *Zur Bedeutung globaler Umwelt-Veränderungen für die Transpiration der terrestrischen Biosphäre*. Diplomarbeit, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Sharkey, T. D., 1990. Feedback limitation of photosynthesis and the physiological role of ribulose biphosphate carboxylase carbamylation. *Botanical Magazine Tokyo*, (**special issue**) **2**, 87–105.
- Shi, P., C. Körner und G. Hoch, 2006. End of season carbon supply status of woody species near the treeline in western China. *Basic and Applied Ecology*, **7**, 370–377.
- Sims, P. L. und J. S. Singh, 1978a. The structure and function of ten western North American grasslands. II. Intra-seasonal dynamics in primary producer components. *Journal of Ecology*, **66**, 547–572.
- Sims, P. L. und J. S. Singh, 1978b. The structure and function of ten western North American grasslands: III. Net primary production, turnover and efficiencies of energy capture and water use. *Journal of Ecology*, **66**, 573–597.
- Sims, P. L., J. S. Singh und W. K. Lauenroth, 1978. The structure and function of ten western North American grasslands. I. Abiotic and vegetational characteristics. *Journal of Ecology*, **66**, 251–285.
- Soepadmo, E., 1978. Introduction to the malaysian I.B.P. synthesis meetings. *The Malayan Nature Journal*, **30**, 119–124.

- Sonnewald, U., 2001. *Regulation of Photosynthesis*, Bd. 11 von *Advances in Photosynthesis and Respiration*, Kap. Sugar Sensing and Regulation of Photosynthetic Carbon Metabolism, S. 109–120. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Spencer, J. W., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, **2**, 172.
- Stackhouse, P. W., S. J. Cox, S. K. Gupta, J. C. Mikovitz und M. Chiacchio, 2004. The WCRP/GEWEX Surface Radiation Budget Data Set: A 1 degree resolution, 12 year flux climatology. (in preparation).
- Stackhouse, P. W., S. K. Gupta, S. J. Cox, M. Chiacchio und J. C. Mikovitz, 2000. The WCRP/GEWEX Surface Radiation Budget Project release 2: An assessment of surface fluxes at 1 degree resolution. In W. L. Smith und Y. M. Timofeyev (Hg.), *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*. International Radiation Symposium, St.Petersburg, Russia, July 24–29, 2000.
- Stitt, M., 1991. Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. *Plant, Cell and Environment*, **14**, 741–762.
- Stitt, M. und A. Krapp, 1999. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant, Cell and Environment*, **22**, 583–621.
- Strand, M. und T. Lundmark, 1995. Recovery of photosynthesis in 1-year old needles of unfertilized and fertilized norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) during spring. *Tree Physiology*, **15**, 151–158.
- Strand, M. und G. Öquist, 1985. Inhibition of photosynthesis by freezing temperatures and high light levels in cold-acclimated seedlings of scots pine (*Pinus sylvestris*). I. Effects on the light-limited and light-saturated rates of CO₂ assimilation. *Physiologia Plantarum*, **64**, 425–430.
- Tadaki, Y., K. Haitya und K. Tochiaka, 1969. Studies on the production structure of forest XV. Primary productivity of *Fagus crenata* in plantation. *Journal of the Japanese Forestry Society*, **51**, 331–339.
- Taylor, K., 1999. Rapid climate change. *American Scientist*, **87**, 320.
- Tcherkez, G., G. Cornis, R. Bligny, E. Gout und J. Ghashghaie, 2005. In vivo respiratory metabolism of illuminated leaves. *Plant Physiology*, **138**, 1596–1606.
- Thompson, M. V., J. T. Randerson, C. M. Malmström und C. B. Field, 1996. Change in net primary production and heterotrophic respiration: How much is necessary to sustain the terrestrial carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 711–726.
- Thornton, P. E., S. W. Running und E. R. Hunt, 2005. Biome-BGC: Terrestrial ecosystem process model, Version 4.1.1. Model product. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

- Tian, H., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, A. D. McGuire und J. Helfrich, 1999. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States. *Tellus*, **51B**, 414–452.
- Tjoelker, M. G., J. Oleksyn und P. B. Reich, 2001. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q₁₀. *Global Change Biology*, **7**, 223–230.
- Tol, R. S. J., S. Fankhauser, R. G. Richels und J. B. Smith, 2000. How much damage will climate change do? – Recent estimates. Working Paper SCG-2, Research Unit Sustainability and Global Change, Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University.
- Van Cleve, K., R. Barney und R. Schlentner, 1981. Evidence of temperature control of production and nutrient cycling in two interior Alaska black spruce ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, **11**, 258–237.
- Van Cleve, K., L. A. Viereck und R. L. Schlenter, 1971. Accumulation of nitrogen in Alder Alnus ecosystems near Fairbanks, Alaska. *Arctic and Alpine Research*, **3**, 101–114.
- VEMAP Members, 1995. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental scale study of terrestrial ecosystem response to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**, 407–437.
- Vitousek, P. M., J. D. Aber, R. W. Howarth, G. E. Likens, P. A. Matson, D. W. Schindler, W. H. Schlesinger und D. G. Tilman, 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, **7**, 737–750.
- Vitousek, P. M. und R. W. Howarth, 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, **13**, 87–115.
- Vose, J. M. und M. G. Ryan, 2002. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis. *Global Change Biology*, **8**, 182–193.
- Vuuren, M., D. Robinson, A. Fitter, S. Chasalow, L. Williamson und J. Raven, 1997. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide and soil water availability on root biomass, root length and N, P and K uptake in wheat. *New Phytologist*, **135**, 455–465.
- Walter, A. und U. Schurr, 2005. Dynamics of leaf and root growth: Endogenous control versus environmental impact. *Annals of Botany*, **95**, 891–900.
- Walter, H. und H. Lieth, 1960. *Klimadiagramm-Weltatlas*. Fischer, Jena.
- Wedin, D. A. und J. Pastor, 1993. Nitrogen mineralization dynamics in grass monocultures. *Oecologia*, **96**, 186–192.
- Wein, R. W. und L. C. Bliss, 1974. Primary production in arctic Cottongrass Tussock tundra communities. *Arctic and Alpine Research*, **6**, 261–274.

- Weiss, A. und J. M. Norman, 1985. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agricultural and Forest meteorology*, **34**, 205–213.
- Whittaker, R. H., 1966. Forest dimensions and production in the Great Smoky Mountains. *Ecology*, **47**, 103–121.
- Whittaker, R. H., F. H. Bormann, G. E. Liekens und T. G. Siccama, 1974. The Hubbard Brook Ecosystem study: Forest biomass and production. *Ecological Monographs*, **44**, 233–252.
- Whittaker, R. H. und W. A. Niering, 1975. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona. V. Biomass, production, and diversity along the elevation gradient. *Ecology*, **56**, 771–790.
- Willmott, C. J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **63**, 1309–1313.
- Wong, S. C., I. R. Cowan und G. D. Farquhar, 1978. Leaf conductance in relation to assimilation in *Eucalyptus pauciflora* Sieb. ex Spreng. Influence of irradiance and partial pressure of carbon dioxide. *Plant Physiology*, **78**, 821–825.
- Woodward, F. I. und T. M. Smith, 1994. *Ecophysiology of Photosynthesis*, Bd. 100 von *Ecological Studies*, Kap. Predictions and Measurements of the Maximum Photosynthetic Rate, A_{max} , at the Global Scale, S. 491–509. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Wright, I. J., P. B. Reich, O. K. Atkins, C. H. Lusk, M. G. Tjoelker und M. Westoby, 2006. Irradiance, temperature and rainfall influence leaf dark respiration in woody plants: evidence from comparisons across 20 sites. *New Phytologist*, **169**, 309–319.
- Würth, M. K. R., S. Peláez-Riedl, S. J. Wright und C. Körner, 2005. Non-structural carbohydrate pools in a tropical forest. *Oecologia*, **143**, 11–24.
- Würth, M. K. R., K. Winter und C. Körner, 1998. Leaf carbohydrate responses to CO₂ enrichment at the top of a tropical forest. *Oecologia*, **116**, 18–25.
- Yoda, K., 1967. Comparative ecological study on three main types of forest vegetation in Thailand III. Community respiration. *Nature and Life in Southeast Asia*, **5**, 83–148.
- Zotz, G., S. Pein und C. Körner, 2005. No down-regulation of leaf photosynthesis in mature forest trees after three years of exposure to elevated CO₂. *Plant Biology*, **7**, 369–374.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Köln, 14.10.2008