

Modellierung der regionalen CO₂-Aufnahme durch Vegetation

Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn

Vorgelegt von
Klaus Wißkirchen
aus Germering

Bonn, August 2005
Angefertigt am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt
(DLR)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbst und ohne jede unerlaubte Hilfe angefertigt habe, dass ich alle verwendeten Quellen kenntlich gemacht habe und dass diese oder eine ähnliche Arbeit noch keiner anderen Stelle als Dissertation eingereicht worden ist.

Erstgutachter: Prof. Dr. Clemens Simmer

Zweitgutachter: Priv. Doz. Dr. Michael Bittner

Tag der Prüfung: 24. August 2005

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn

http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Erscheinungsjahr: 2005

Zusammenfassung

Im globalen Kohlenstoffkreislauf bilden terrestrische Ökosysteme und der Austausch von CO₂ ein wichtiges Untersystem. Für die Erfassung der Quellen und Senken von CO₂ über Landökosystemen ist die Modellierung in den letzten Jahren zu einem wichtigen Werkzeug geworden, um diesen wichtigen Stoffkreislauf besser zu verstehen und die Austauschprozesse zu quantifizieren. Mit der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen für eine operationelle, auf Fernerkundungsdaten basierende Modellierung der CO₂-Bilanz der Landoberflächen am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geschaffen. Schwerpunkt dabei sind die NPP (Net Primary Productivity) und die NEP (Net Ecosystem Productivity) Europas. Zur Realisierung war zunächst die Auswahl eines geeigneten Modells notwendig. Die Wahl fiel hierbei auf das Modell BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Model, Knorr, 1997). Dieses verbindet die Simulation der Photosynthese nach Farquhar (1980) und Collatz (1992) mit der Berechnung des Energie- und Wasserhaushaltes. Die Absorption der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) im Bestand wird mit der Zweistromapproximation nach Sellers (1985) simuliert. Photosynthese und Verdunstung werden unter Berücksichtigung der täglichen Variabilität des meteorologischen Antriebs (Strahlung und Temperatur) bestimmt, Wasser- und Schneebilanz werden täglich berechnet. Als Eingangsdaten werden die PELCOM-Landklassifikation mit 1 km Auflösung (Mücher et al., 2000), LAI-Zeitreihen der Universität Boston (Myneni et al., 1997) mit 16 km Auflösung und meteorologische Daten des ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast, Reading, UK) mit einer Auflösung von 0,5° verwendet.

Eine Evaluierung des Modells und der Eingangsdaten mit Messdaten des CARBOEUROPE-Netzwerkes (Valentini, 2000) zeigt, inwieweit Ergebnisse und Eingangsdaten des Modells mit Stationsmessungen übereinstimmen. Weiterhin wird untersucht, wie stark sich Abweichungen in den Eingangsdaten auf die Qualität der Simulationsergebnisse auswirken. Die aus ECMWF-Analysen der Bewölkung abgeleitete photosynthetisch aktive Strahlung korreliert gut mit den Stationsdaten, wird jedoch systematisch leicht überschätzt. Die aus den Analysen abgeleiteten Tagesmitteltemperaturen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Stationsdaten. Der Niederschlag aus ERA40 Reanalysen des ECMWF wird im Vergleich zu den Messungen systematisch unterschätzt.

Die Kontrollsimulation mit Stationsdaten als Input weist mit $r^2=0,93$ eine

hohe Korrelation zwischen simulierter und gemessener NEP und eine systematische leichte Überschätzung der NEP auf. Bei den Simulationen mit Flächendaten als Input entstehen die größten Abweichungen zwischen Messungen und Modell durch Fehlklassifikationen in der Landbedeckung und durch die Überschätzung des LAI. Beide Effekte zusammen führten im Extremfall zu einer Überschätzung der NEP um einen Faktor von 4,7. Das Ergebnis macht deutlich, dass eine besondere Sorgfalt bei der Verwendung der Landoberflächenparameter aufgewendet werden muss und dass bei Modellstudien die Auswirkungen von Abweichungen in den Eingangsdaten unbedingt zu beachten und zu dokumentieren sind.

Den Abschluss der Arbeit bilden regionale Simulationen der CO₂-Bilanz. Eine Simulation für Deutschland gibt Aufschluss über die regionale Verteilung von Quellen und Senken. Weiterhin wird erstmals der Beitrag der einzelnen Landbedeckungsklassen in der CO₂-Bilanz Deutschlands aufgeschlüsselt. Die Waldgebiete in Deutschland sind im Simulationsjahr 1998 eine Nettosenke für CO₂ mit NEP = 72 TgC/Jahr. Das Ergebnis liegt in einer vergleichbaren Größenordnung wie der in der Arbeit von Veroustrate et al. (2003) angegebene Wert von 54 TgC/Jahr für 1997, der als einziger direkter Vergleich vorliegt. Überraschend sind die hohen Werte von NPP und NEP für die als Grasland klassifizierten Gebiete. Die Frage bleibt offen, ob dieses Ergebnis ein realer Effekt ist oder seine Ursache in der Überschätzung des LAI durch den verwendeten Datensatz liegt. Dies gilt speziell für die weitgehend landwirtschaftlich genutzten Graslandgebiete in Deutschland. Um die Ergebnisse richtig einzuordnen sind langfristige Messungen des CO₂-Austausches über Grasland notwendig, die mit den Modellergebnissen verglichen werden können. Eine weitere regionale Studie erfolgt für das Gebiet um den Tharandter Wald bei Dresden unter Verwendung neuer LAI-Zeitreihen mit 1 km Auflösung, die aus Daten vom NOAA-AVHRR unter Verwendung des Sellers-Algorithmus (1985) am DFD abgeleitet werden. Die Verteilung der CO₂-Quellen- und -Senken lässt sich in den Jahreswerten von NPP und NEP gut erkennen. Die Waldgebiete stellen hier Senken für CO₂ dar während landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgrund ihrer höheren Bodenatmung Quellen für CO₂ sind. Mit der vorliegenden Arbeit wurde die Grundlage für eine operationelle Simulation der terrestrischen CO₂-Bilanz am DFD gelegt. Evaluierung und regionale Simulationen bestätigen die generelle Eignung von Modell und Daten für diesen Zweck und zeigen Schwachpunkte auf, die bei künftigen Arbeiten beachtet und verbessert werden können. Das nach Abschluss der Arbeit vorliegende Softwarepaket mit allen notwendigen Schnittstellen für die Eingangsdaten wird zukünftig am DFD operationell eingesetzt. Das Simulationsgebiet wird auf Europa ausgedehnt, so dass künftig ein Beitrag zur

europaweiten Bestimmung der Quellen und Senken von CO₂ geliefert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Der globale Kohlenstoffkreislauf	3
1.2	Bestimmung der Kohlenstoffbilanz	6
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	9
2	Das Vegetationsmodell BETHY	12
2.1	Allgemeines zur Vegetationsmodellierung	12
2.1.1	Beschreibung des Vegetationszustandes	14
2.1.2	Photosynthese und Stomatakontrolle	18
2.2	Zur Wahl des Modells	22
2.3	BETHY: Parametrisierungen	24
2.3.1	Verteilung der Vegetationsparameter	24
2.3.2	Meteorologischer Antrieb des Modells	26
2.3.3	Wasser- und Energiebilanz	27
2.3.4	Modellierung der Photosynthese	29
2.3.5	CO ₂ -Bilanz	31
2.3.6	Zusammenfassung	32
3	Datengrundlage	33
3.1	Landbedeckung	33
3.2	Vegetationszustand, Blattflächenindex	35
3.3	Meteorologischer Antrieb	36
4	Sensitivitätstests	40
4.1	Initialisierung des Bodenwassergehaltes	41
4.2	Blattflächenindex	42
4.3	Niederschlag	43
4.4	Randbedingung: Windgeschwindigkeit	45
4.5	Randbedingung: CO ₂ -Konzentration	46
4.6	Gewichtung der Vegetationstypen	
	Laub- und Nadelwald	47

4.7	Parametrisierung der Tagesgänge	48
5	Evaluierung des Modells	58
5.1	Daten und Stationen	58
5.2	Kontrolllauf mit Stationsdaten	60
5.3	Simulation mit Flächeninput	63
5.3.1	Analyse des Modellinputs	65
5.3.2	Simulation mit LAI-Korrektur	72
5.3.3	Korrektur der Landnutzung	74
5.3.4	Korrektur der PAR	77
5.4	Verwendung von Globalstrahlung	78
5.5	Zusammenfassung	82
6	Regionale CO₂-Bilanzierung	86
6.1	Die CO ₂ -Bilanz von Deutschland	86
6.2	Ein erster Test neuer LAI-Zeitreihen	93
6.3	Fehlerbetrachtung	95
7	Zusammenfassung und Ausblick	100
	Literaturverzeichnis	104
A	Tabellen	111
B	Variablenliste	115

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Der globale Kohlenstoffkreislauf

Die Biosphäre bildet einen wichtigen Teilbereich des Klimasystems. Sie beeinflusst atmosphärische Prozesse durch den Strahlungshaushalt an der Landoberfläche (Albedo, Reflektion und Transmission) und durch aerodynamische (Oberflächenrauigkeit) Eigenschaften des Untergrundes. Eine weitere wichtige Kopplung ergibt sich durch den Stofftransport zwischen Biosphäre und Atmosphäre. Stoffkreisläufe, an denen Vegetation einen entscheidenden Anteil hat, sind z.B. der Wasser- und Kohlenstoffkreislauf sowie der Stickstoffkreislauf.

Dem durch CO_2 bedingten Austausch von Kohlenstoff kommt aktuell eine besondere Bedeutung im globalen Kohlenstoffkreislauf zu. Die seit der Industrialisierung anwachsenden anthropogenen Emissionen von CO_2 in die Atmosphäre führen zu einer deutlichen Zunahme der Konzentration von atmosphärischem CO_2 . Dies führt wiederum zu einer Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes, da die Zunahme nicht durch die natürlichen Senken kompensiert werden kann. Die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes hat mit sehr großer Wahrscheinlichkeit den größten Anteil an der derzeit beobachteten Zunahme der globalen Mitteltemperatur (Houghton et al., 2001). Quellen und Senken für CO_2 und ihre Änderungen durch veränderte Umwelteinflüsse und Änderungen in der Landnutzung genauer zu bestimmen, ist daher eine wichtige Aufgabe. Aufgrund dessen hat die Erforschung des Anteils von Landökosystemen am globalen Kohlenstoffkreislauf und speziell am Austausch von CO_2 stark zugenommen.

Die globale Kohlenstoffbilanz sieht wie folgt aus (Watson et al., 2000, Abbil-

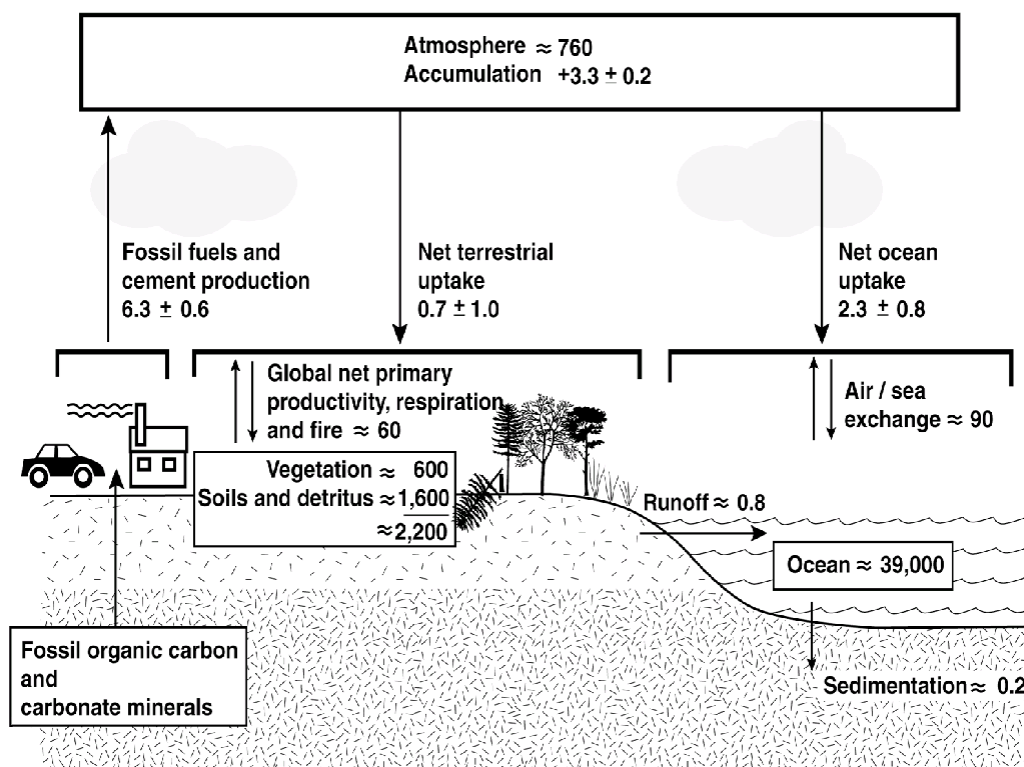


Abbildung 1.1: Globaler Kohlenstoffkreislauf nach dem IPCC Report Land Use, Land Use Change and Forestry (Watson et al., 2000). Dargestellt sind die Kohlenstoffspeicher (Gt) und -flüsse zwischen den Teilsystemen (Gt/Jahr) als Mittelwerte über dem Zeitraum von 1989 -1998. Zu beachten ist die im Vergleich zu den anderen Teilsystemen sehr große Unsicherheit in der terrestrischen Bilanz.

Abbildung 1.1): Der anthropogene Eintrag von Kohlenstoff in die Atmosphäre beträgt im Durchschnitt $6,3 \pm 0,6$ GtC/Jahr. Dagegen stehen $2,3 \pm 0,8$ GtC/Jahr, die vom Ozean aufgenommen werden. Landökosysteme bilden eine vergleichsweise kleine Senke von $0,7 \pm 1,0$ GtC/Jahr. Der durchschnittliche Nettofluss von Kohlenstoff in der Atmosphäre beträgt damit $3,3 \pm 0,2$ GtC/Jahr. Bei der Betrachtung der Kohlenstoffbilanz muss berücksichtigt werden, dass in dieser nicht nur CO_2 enthalten ist, sondern auch Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH_4) und NMVOC's (Non Methane Volatile Organic Compounds, lösliche organische Kohlenwasserstoffe). CO entsteht bei Verbrennungsprozessen, wird also ausschließlich in die Atmosphäre emittiert. CH_4 wird durch bakterielle Aktivitäten bei Gärungsprozessen freigesetzt. Die natürlichen Quellen werden hier durch anthropogene Einflüsse deutlich verstärkt (z.B. durch Massentierhaltung und Reisanbau). NMVOC's werden dagegen durch die

Vegetation freigesetzt. Im Gegensatz zu CO_2 und CH_4 , die einen direkten Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre besitzen, besteht die Klimawirksamkeit der NMVOC's hauptsächlich darin, dass sie die Oxidationskapazität der Atmosphäre einschränken, was wiederum den Abbau klimarelevanter Spurengase einschränkt (Paliouras et al., 2003). Da CO_2 von den klimarelevanten Spurengasen den höchsten direkten Anteil an der anthropogenen Modifikation des Treibhauseffektes besitzt (Houghton et al., 2001), wird in der vorliegenden Arbeit der Anteil des Kohlenstoffkreislaufes behandelt, der den Austausch von CO_2 umfasst.

Für die Kohlenstoffbilanz Europas fanden Janssens et al. (2003) eine Netto-senke zwischen 135 und 205 TgC/Jahr, was 7-12% der europäischen anthropogenen Kohlenstoffemissionen des Jahres 1995 entspricht. Die natürlichen Emissionen von Methan und NMVOC's betragen dabei 20 TgC/Jahr und 50 TgC/Jahr. Für die Waldökosysteme Europas gaben Nabuurs et al. (1997) eine Nettosenke von 101,3 TgC/Jahr an, was 9,1% der europäischen anthropogenen Emissionen entspricht. Auf das Gebiet der früheren Bundesrepublik Deutschland (für 1987) entfiel eine Nettosenke von 5,5 TgC/Jahr. Bei Watson et al. (2000) wurde für das Gebiet der EU eine Nettosenke (Total Net Removal) von 51,1 TgC/Jahr für das Jahr 1990 angegeben. Davon entfielen 9,2 TgC auf die Waldgebiete in Deutschland.

Für den alleine durch CO_2 bedingten Austausch von Kohlenstoff über Europa berechneten Veroustrate et al. (2002) eine Senke von 735,25 TgC/Jahr für das Jahr 1997 durch Simulationen mit dem Vegetationsmodell C-Fix. Für Deutschland ergab sich dabei eine CO_2 -Senke von 53,99 TgC/Jahr. In einer ersten Schätzung kommt das Forschungsnetzwerk CarboEurope (Freibauer, 2001) zu einer CO_2 Senke für Europa von 700 TgC/Jahr, basierend auf Simulationen troposphärischer CO_2 -Konzentrationen und von 200-300 TgC/Jahr für die Europäischen Wälder (basierend auf Forstinventaren).

Der Austausch von CO_2 durch Vegetation umfasst mehrere Teilprozesse (siehe auch Abbildung 1.2). Einerseits nimmt Vegetation bei der Photosynthese CO_2 aus der Atmosphäre auf. Die dabei aufgenommene Menge an CO_2 wird als Bruttoprimärproduktion (Gross Primary Productivity, GPP) bezeichnet. Durch Zellatmung der Blätter, des Holzes und der Wurzeln wird wiederum CO_2 an die Atmosphäre abgegeben. Dies wird als autotrophe Respiration R_a bezeichnet. Die effektiv durch die Vegetation aufgenommene Menge an CO_2 wird als Nettoprimärproduktion (Net Primary Productivity, NPP) bezeichnet und berechnet sich aus der Differenz zwischen GPP und autotropher Respiration:

$$NPP = GPP - R_a \quad (1.1)$$

Aus dem Boden wird zusätzlich durch Verwitterungsprozesse und Bakterien CO_2 freigesetzt. Dieser in die Atmosphäre emittierte Anteil wird als heterotrophe Respiration R_h bezeichnet. Zusammen mit der autotrophen Respiration ergibt sich der im Netto aufgenommene Anteil der Landökosysteme, die Netto-Ökosystemproduktion (Net Ecosystem Productivity, NEP):

$$NEP = NPP - R_h \quad (1.2)$$

Natürliche oder anthropogene Störungen der Ökosysteme (z.B. Feuer oder Änderungen der Landnutzung durch den Menschen) können ebenfalls zur Emission von Kohlenstoff in die Atmosphäre beitragen. Die vollständige Bilanz unter Einbezug dieser Prozesse wird als Netto-Biomeproduktivität (Net Biome Productivity, NBP) bezeichnet.

1.2 Bestimmung der Kohlenstoffbilanz

Zur Bestimmung der terrestrischen Kohlenstoffbilanz gibt es mehrere Möglichkeiten (Nabuurs et al., 1997). Eine Möglichkeit ist die statische Schätzung aus Forstbestandsaufnahmen. Dazu wird das Holzvolumen in den Kohlenstoffgehalt des Forstes umgerechnet. Weiterhin werden Änderungen der Landnutzung in Berechnungen dieser Art aufgenommen. Eine dynamische Methode ist die Berechnung der Kohlenstoffflüsse aus dem beobachteten Wachstum (Stammdurchmesser) und Ertragstabellen. Weiterhin können mit Messstationen die Nettoflüsse zwischen Atmosphäre und Bestand ermittelt werden. Hierzu werden oft Messungen nach der Eddy-Kovarianz-Methode verwendet (Grünwald, 2003). Die auf diese Weise ermittelten Stoffflüsse sind zunächst nur für das Gebiet um den Standort der Station repräsentativ. Um vom Stationsstandort auf den Bestand schließen zu können, ist daher ein Upscaling notwendig.

Eine weitere Methode ist die Simulation der Kohlenstoffflüsse und -speicher mit Vegetationsmodellen. Dabei werden Informationen zu Land- und Vegetationsbedeckung (d.h. der geographischen Verteilung der Vegetation) und Wetter- bzw. Klimadaten dazu verwendet, mittels empirischer und/oder physikalischer Beziehungen den Kohlenstoffaustausch von Beständen zu ermitteln. Dabei ist die Komplexität der Modelle sehr unterschiedlich. So gibt es korrelative Modelle, die auf empirischen Beziehungen zwischen dem CO_2 -Austausch und Klimavariablen beruhen. Einfache mechanistische Modelle simulieren zwar Photosynthese, berücksichtigen dabei jedoch häufig keine Kopplung zwischen Wasserhaushalt und CO_2 -Assimilation (C-Fix: Veroustrate, 2002). Weiterhin gibt es Modelle mit vollständiger Kopplung von Energiebilanz, Wasserbilanz und Photosynthese (ALEX: Anderson et al., 2000,

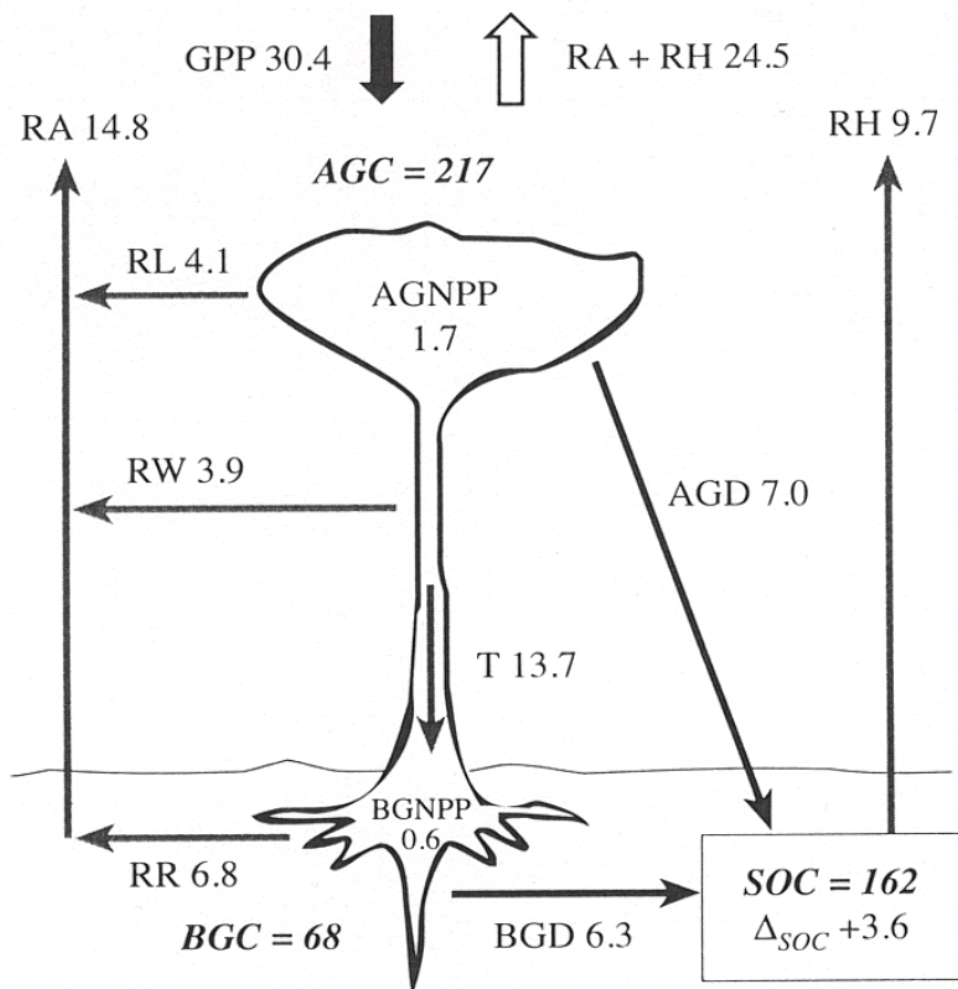


Abbildung 1.2: Darstellung der terrestrischen Kohlenstoffflüsse am Beispiel des tropischen Regenwaldes in Manaus, Brasilien. Quelle: IPCC Report Land Use, Land Use Change and Forestry (Watson et al., 2000). Abgebildet sind Kohlenstoffspeicher (tC/ha) und -flüsse (tC/ha/Jahr, Pfeile). Die autotrophe Respiration R_a setzt sich zusammen aus der Atmung von Holz (R_W), Wurzeln (R_R) und Blättern (R_L).

CECM: Zahn et al., 2001). Ein wichtiger Fortschritt in der Klimamodellierung ist die Verwendung dynamischer Vegetationsmodelle (Dynamic Global Vegetation Models, DGVM's), die die simulierte CO_2 -Bilanz in den Auf- und Abbau von Biomasse umsetzen. In Kopplung mit Klimamodellen können damit Rückkopplungen zwischen Vegetations- und Klimaentwicklung unter-

sucht werden wie z.B. die Verschiebung von Vegetationszonen bei Klimaänderungen und damit einhergehende Änderungen des hydrologischen Kreislaufes. Ein Beispiel für ein solches Modell ist das LPJ (Lund Potsdam Jena Modell: Sitch et al., 2003). Um die Genauigkeit der Modelle zu ermitteln, ist eine Validierung der Ergebnisse mit Messungen notwendig.

Folgende Ansätze finden bei der Modellierung der terrestrischen Kohlenstoffbilanz Verwendung: Zum einen können meteorologische und phänologische Größen direkt zum Antrieb des Modells verwendet werden. Wenn vom Modell prognostisch gerechnete Variablen als Messungen vorliegen, besteht die Möglichkeit, die Daten in das Modell zu assimilieren (Bach et al., 2003). Beispielsweise können Messungen des Bodenwassergehaltes dazu verwendet werden, den vom Modell simulierten Bodenwassergehalt zu korrigieren (Nudging) oder eine Kalibrierung der Modellparameter vorzunehmen (Knorr, 2001). Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung von Quellen und Senken atmosphärischen Kohlenstoffs ist die inverse Modellierung. Dabei wird durch Invertierung eines atmosphärischen Transportmodells aus der Verteilung atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf die Quellen und Senken von CO₂ geschlossen (Kaminski et al., 1999, Janssens et al., 2003).

Zur Berechnung der Quellen und Senken von CO₂ ist es notwendig, eine genaue Kenntnis über die Verteilung der Vegetation und ihren Zustand zu besitzen. Eine flächendeckende Bestimmung von Vegetationsparametern „in situ“ ist in vielen Gebieten der Erde jedoch nicht möglich. Satellitendaten bilden die einzige Möglichkeit flächendeckende, kontinuierliche Zeitreihen über große Gebiete zu erhalten. Satellitendaten können direkt als Antriebsdaten für Modelle dienen. Sie können aber auch in Modelle assimiliert werden, wenn die entsprechenden Variablen dort prognostisch gerechnet werden.

Eine wichtige Eingangsgröße in Vegetationsmodellen, die mit Hilfe von Satellitendaten bestimmt werden kann, ist die Klassifikation der Landbedeckung. Sie beschreibt die räumliche und zeitliche Verteilung der Vegetationstypen. Wichtig ist aber auch der Zustand der Vegetation. Darüber geben z.B. Vegetationsindizes wie der NDVI (Normalized Differences Vegetation Index) Auskunft. Der NDVI ist eine reine Sensorgröße, die aus zwei Messkanälen eines Sensors (Nahinfrarot und sichtbares Licht) gebildet wird. Weiterhin finden physikalische Kenngrößen der Vegetationsbedeckung Verwendung. Der Blattflächenindex LAI (Leaf Area Index) ist definiert als Gesamtblattfläche/m². Immer häufiger findet auch der Anteil der im Bestand absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung, FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation), Verwendung. Der Vorteil dieser Größe ist, dass die Lichtabsorption im Bestand vom Wasserstress der Vegetation abhängig ist

und damit indirekt der Einfluss des Bodenwassergehaltes auf Lichtabsorption und Photosynthese im Bestand berücksichtigt wird. LAI und FAPAR können aus dem NDVI und der Landbedeckungsart abgeschätzt (z.B. Sellers, 1996) oder aus den Sensordaten mit Hilfe eines Strahlungstransportmodells für den Bestand abgeleitet werden (Knyazikhin et al., 1999). Eine weitere Möglichkeit der Fernerkundung von Vegetation ergibt sich aus der Verwendung von Radarsensoren. Mit diesen können Vegetationshöhe und vorhandene Biomasse von Vegetation abgeschätzt werden.

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Die in Abbildung 1.1 angegebenen Fehler der Kohlenstoffflüsse machen deutlich, dass die Erfassung des Austauschs zwischen Biosphäre und Atmosphäre nach wie vor eine hohe Unsicherheit im globalen Kohlenstoffkreislauf darstellt. Ursachen für diese Unsicherheiten sind z.B. die hohe räumliche Variabilität der Vegetation, bisher unzureichend erfasste Prozesse wie Vegetationsfeuer und die schwierige qualitative und quantitative Erfassung der Auswirkungen von Änderungen der Landbedeckung.

Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass es nur wenige Messungen oder Simulationen des Austausches von CO₂ oder anderen kohlenstoffhaltigen Spurengasen mit der Vegetation gibt, die über lange Zeiträume kontinuierlich mit der gleichen Qualität vorliegen. Ein Beispiel für langfristige Messungen dieser Art ist die Ankerstation Tharandt bei Dresden, an der seit 1996 der CO₂-Austausch mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Methode bestimmt wird (Grünwald, 2003). Simulationen des CO₂-Austauschs durch Vegetation umfassen im längsten Fall siebzehn Jahre (Potter et al., 2003) und besitzen eine räumliche Abdeckung, die von der globalen Skala (Nemani et al. 2003) bis zu regionalen Studien reicht (Tate et al., 2000). Erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit gibt es Bestrebungen, den Austausch von CO₂ operationell zu erfassen, d.h. kontinuierlich unter gleichen Bedingungen und mit einer permanenten Qualitätskontrolle der Ergebnisse (Veroustrate et al., 2002, Running et al., 1999). Hierfür gibt es mehrere Ursachen: Seit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls und der damit verbundenen Verpflichtung, die anthropogenen Emissionen klimarelevanter Spurengase einzuschränken, gleichzeitig aber Senken im eigenen Land anrechnen zu können (Emissionshandel), besteht die politische Notwendigkeit, den Austausch von klimarelevanten Spurengasen zu beobachten (Konventionsmonitoring). Weiterhin sind mit steigenden Computerkapazitäten die Möglichkeiten dafür gegeben, große Datenmengen in einer vertretbaren Zeit zu bearbeiten. Zusätzlich dazu eröffnen sich mit neuen Satellitensensoren wie z.B. TERRA-MODIS bessere Möglichkeiten für die Fernerkundung der

für die Erfassung des Stoffaustausches zwischen Vegetation und Atmosphäre wichtigen Vegetationsparameter wie z.B. LAI oder FAPAR (Knyazikhin et al., 1999).

Die vorliegende Arbeit wurde am Deutschen Fernerkundungs-Datenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Mittelfristig soll hier ein System zur operationellen Modellierung der GPP, NPP und NEP für Europa entstehen. Operationell bedeutet, dass kontinuierlich, nach einem festen Zeitschema und in Echtzeit (die Simulationszeit eines Prozesses darf die Zeitskala dieses Prozesses nicht überschreiten) Simulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollen zu einem besseren Verständnis der Quellen und Senken von CO₂ im Simulationsgebiet beitragen und zur Beobachtung von Klimakonventionen eingesetzt werden. Als Ergebnis sind Jahres- und Monatswerte der CO₂-Bilanz angestrebt. Als Zeitschritt für die Simulationen reichen Tageswerte aus, sofern sichergestellt ist, dass die meteorologischen Eingangsdaten und das Modell die Variabilität der Tagesgänge berücksichtigen (Chen et al., 1999) wie z.B. die Temperaturamplitude. Die zugrundeliegenden Vegetationsparameter sollen eine möglichst hohe räumliche Auflösung besitzen, da nur so die enorme Variabilität der Vegetation berücksichtigt werden kann. (Tate et al., 2000, pers. Gespräch, Dr. Kurt Günther, DLR-DFD, 2004).

In *Kapitel zwei* werden verschiedene Modellansätze zur Simulation des Austausches zwischen Vegetation und Atmosphäre vorgestellt, mit dem Schwerpunkt des Austauschs von CO₂. Aus den Rahmenbedingungen für die künftigen operationellen Simulationen ergeben sich Einschränkungen in der Auswahl des Modells. Aufgrund der Auswahlkriterien wurde für die vorliegende Arbeit und zukünftige Simulationen das Modell BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Model, Knorr, 1997) ausgewählt, welches kurz beschrieben werden soll. Im *dritten Kapitel* werden die zum Betrieb des Modells verwendeten Datensätze vorgestellt. Dies sind die meteorologischen Größen Strahlung, Temperatur und Niederschlag sowie der Vegetationsparameter LAI und die Landbedeckungsarten.

Sensitivitätsstudien sollen in *Kapitel vier* zeigen, wie stark sich Unsicherheiten in den Eingangsdaten und in der Parametrisierung von Tagesgängen der meteorologischen Größen Strahlung und Temperatur durch das Modell auf die Simulationsergebnisse auswirken. Das *fünfte Kapitel* behandelt die Evaluierung des Modells mit Stationsmessungen von CO₂-Flüssen über ganz Europa. Dabei soll überprüft werden, wie gut die simulierten CO₂-Flüsse und die dazu verwendeten meteorologischen Zeitreihen und Vegetationsparameter mit den Stationsdaten übereinstimmen und welche Abweichungen in den Eingangsdaten die größten Auswirkungen auf die Modellergebnisse besitzen.

Im *sechsten Kapitel* werden als erster Test auf einem größeren Gebiet die GPP, NPP und NEP für Deutschland für das Jahr 1998 bestimmt. Dabei soll untersucht werden, welche Landbedeckungsart die höchsten Werte der CO₂-Assimilation aufweist. Weiterhin werden die Abhängigkeiten zwischen den wichtigsten Antriebsgrößen des Modells und der NPP untersucht. Zum Abschluß des Kapitels werden erste Tests unter Verwendung neuer, höher aufgelöster Zeitreihen des LAI durchgeführt. Diese sollen den Informationsgewinn demonstrieren, der durch die Verwendung höher aufgelöster Vegetationsdaten bei der Simulation der NPP und NEP entsteht.

Kapitel 2

Das Vegetationsmodell BETHY

Am Deutschen Fernerkundungs-Datenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sollen künftig operationell Simulationen der CO₂-Bilanz (GPP, NPP und NEP) terrestrischer Vegetation gerechnet werden. Diese sollen kontinuierlich eine quantitative Analyse der Quellen und Senken von CO₂ liefern. Die physikalischen Wechselwirkungen der am Austausch beteiligten Systemkomponenten (Boden, Vegetation und Atmosphäre) sollen dabei berücksichtigt werden. Dies ist wichtig für eine genaue quantitative Abschätzung der CO₂-Bilanz und soll dazu beitragen, das Verständnis der am Austausch beteiligten Prozesse zu vertiefen. Die Erfassung der regionalen Quellen und Senken von CO₂ soll weiterhin einen Beitrag zur Überwachung von Klimakonventionen leisten (Konventionsmonitoring). Bevor das hierfür gewählte Modell BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Model, Knorr, 1997) vorgestellt wird, werden zunächst Ansätze zur Modellierung des Austauschs von CO₂ zwischen Vegetation und Atmosphäre vorgestellt.

2.1 Allgemeines zur Vegetationsmodellierung

Atmosphäre, Boden und Vegetation treten in vielfältiger Weise in Wechselwirkung miteinander. Vegetation beeinflusst die Strahlungsbilanz am Boden und wirkt sich damit direkt auf die verfügbare Energie in der atmosphärischen Grenzschicht aus. Die kurzwellige Strahlungsbilanz wird durch die Albedo und durch die bei verschiedenen Vegetationstypen unterschiedliche Transmission kurzwelliger Strahlung zum Boden beeinflusst. In der langwelligeren Strahlungsbilanz kommt die Ausstrahlung der Vegetation nach den Gesetzen von Planck und Kirchhoff als zusätzliche Komponente hinzu. Die turbulenten Transporte in der atmosphärischen Grenzschicht über einer

bewachsenen Fläche werden durch die im Gegensatz zur unbewachsenen Fläche höhere Oberflächenrauigkeit verstärkt.

Eine weitere wichtige Wechselwirkung zwischen den Systemen Boden, Vegetation und Atmosphäre ergibt sich durch die Kopplung des Stoffwechsels der Vegetation mit dem Wasserhaushalt. Der zur Photosynthese notwendige Gasaustausch mit der Umgebung erfolgt über die Spaltöffnungen der Blätter, die Stomata. Diese sind umso weiter geöffnet, je besser die Umgebungsbedingungen (vor allem Lichtverfügbarkeit, Temperatur und Bodenwassergehalt) für die Photosynthese sind. Weiterhin verdunsten Pflanzen Wasser über die Stomata (Transpiration). Das verdunstete Wasser wird dem Boden durch die Wurzeln entzogen. Dadurch kann selbst dann noch ein Input von Wasserdampf in die Atmosphäre stattfinden, wenn die direkte Verdunstung von Bodenwasser (Evaporation) schon stark limitiert ist.

Böden wirken als Wasserspeicher, haben aber auch einen nicht unerheblichen Anteil am Energieaustausch mit der Atmosphäre, sofern die Vegetation nicht allzu dicht ist. Die Wärmeleitfähigkeit und damit der Anteil des Bodens an der Energiebilanz wird stark vom Bodenwassergehalt beeinflusst. Sie kann bei einem wassergesättigten Boden rund achtmal so hoch sein bei einem trockenen (Scheffer, Schachtschabel, 2002).

Vegetationsmodelle gibt es in den vielfältigsten Ausführungen und Kombinationen der betrachteten Prozesse. In der Meteorologie und Klimatologie finden sogenannte SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) Modelle Verwendung. Diese dienen der Berechnung der Energiebilanz und des Austauschs von Energie und Stoffen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre. Die Konzepte zur Modellierung reichen dabei von einfachen empirischen Zusammenhängen bis zu komplexen physikalischen Beschreibungen. Der Einfluss der Vegetation auf die Wasserbilanz macht diese Modelle auch zu einem wichtigen Hilfsmittel in der Hydrologie und in der Landwirtschaft.

Sogenannte Production Efficiency Models (PEM's) sind Modelle, welche die NPP auf der Basis statistischer Zusammenhänge berechnen (NASA, 2000). Dies geschieht unter Verwendung eines vereinfachten Ansatzes nach Monteith (s.u.), der die Photosynthese mit einer Lichtnutzungseffizienz (Light Use Efficiency, LUE) und der zur Verfügung stehenden Sonneneinstrahlung parametrisiert. Der Einfluss weiterer Zustandsgrößen auf die Photosynthese wie Temperatur und Niederschlag wird durch die Verwendung empirisch bestimmter Faktoren berücksichtigt. PEM's (z.B. Goetz et al., 1999, Veroustrate et al., 2002) sind in der Regel speziell für den Einsatz von Satellitendaten ausgelegt (NASA, 2000) und auf die Verwendung bestimmter Satellitensensoren zugeschnitten. Obwohl sich mit solchen einfachen Ansätzen bereits quali-

tativ gute Ergebnisse erzielen lassen, ist es damit nicht möglich, wie gefordert die physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten Boden, Vegetation und Atmosphäre detailliert zu untersuchen. Weiterhin ist die Berücksichtigung der am Austausch beteiligten physikalischen Prozesse eine Voraussetzung für eine quantitativ genaue Abschätzung der CO₂-Bilanz.

In vielen SVAT Modellen wird der Vegetationszustand während der Simulation als zeitlich konstant vorausgesetzt. Wichtige Größen zur Beschreibung der Vegetation wie Vegetationstyp, Blattflächenindex oder der Vegetationsbedeckungsgrad werden entweder von außen vorgegeben oder während der Simulation konstant gehalten. Solange die Zeitskala der Simulationen klein gegenüber der Zeitskala der Änderungen im Vegetationszustand ist, stellt dies kein Problem dar. So kann z.B. die zeitliche Änderung des Blattflächenindex (LAI) vernachlässigt werden, solange die Simulationsdauer nur wenige Tage beträgt. Für Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft oder bei Klimasimulationen ist das häufig jedoch nicht ausreichend. Beispielsweise ist bei Klimasimulationen über Zeiträume von mehreren hundert Jahren die Voraussetzung unzutreffend, dass die geographische Verteilung der Vegetationstypen zeitlich konstant ist. Weiterhin ist die Möglichkeit der Einbeziehung externer Datenquellen (z.B. für den LAI) nicht mehr gegeben. Daher wird die Verwendung dynamischer Vegetationsmodelle immer wichtiger. Diese berechnen explizit den Aufbau und Verlust von Biomasse (Wachstum, Laubfall und Verwitterung) aus der Simulation der Photosynthese. Damit erst können das Entstehen und Vergehen von Biomen bei veränderten Klimabedingungen und langfristige Rückkopplungen zwischen Vegetation und Atmosphäre simuliert werden. Diese Art von Modellen wird auch als DGVM's (Dynamic Global Vegetation Models) bezeichnet. Ein Beispiel hierfür ist das Modell LPJ (Lund Potsdam Jena Modell, Sitch et al., 2003). Den Wandel hin zu einer vollständigen Modellierung der Vegetation und ihrer Wechselwirkungen mit der Umwelt beschreibt Peng (2000).

2.1.1 Beschreibung des Vegetationszustandes

Eine wesentliche Voraussetzung zur Modellierung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Vegetation und Atmosphäre, ist die Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Vegetationsverteilung. Dabei muss zwischen Vegetationsarten, Vegetationstypen und Landbedeckungsarten unterschieden werden. Vegetationstypen fassen strukturelle Merkmale von Pflanzenarten mit gleichem oder ähnlichem Aufbau zusammen. So können z.B. Fichten, Tannen und Kiefern zu einem Vegetationstyp „immergrüner Nadelwald“ zusammengefasst werden, während Lärchen dem Typ „laubabwerfender Nadelwald“ zugeordnet

werden. Die für die Modellierung der Photosynthese und damit des Stoff- und Energieaustausches wichtigen Parameter werden meistens für Vegetationsart oder -typen ermittelt. Was günstiger ist, hängt von der Verwendung des Modells ab. So ist es z.B. für agrarmeteorologische Simulationen wichtig, die Parameter der angebauten Fruchtart zu kennen, da die Simulation (z.B. des Wasserbedarfs) auf genau deren Eigenschaften abgestimmt sein soll. Dagegen ist es bei regionalen oder globalen Simulationen ausreichend, mittlere Vegetationsparameter der Vegetationsarten innerhalb eines Vegetationstyps zu benutzen.

Die in einem Gebiet vorherrschenden Vegetationstypen bestimmen wiederum die Landbedeckungsart. So dominieren innerhalb der Landbedeckungsart „Mischwald“ die Vegetationstypen „Laubwald“ und „Nadelwald“; innerhalb der Landbedeckungsart „Nadelwald“ in Zentraleuropa der Vegetationstyp „immergrüner Nadelwald“. Beispiele für die Zusammenfassung von Vegetationstypen zu Klassen der Landbedeckung sind bei Knorr (1997) zu finden. Eine weitere Unterscheidung der Vegetationsarten und -typen muss in Bezug auf die Photosynthese getroffen werden. Es gibt zwei Photosynthesarten: C3- und C4-Photosynthese. Bei letzterer ist die Vegetation in der Lage, CO_2 innerhalb der Blätter zu fixieren. Dies ist von Vorteil, wenn die CO_2 -Konzentration der limitierende Faktor bei der Photosynthese ist, z.B. wenn sich durch Wasserstress die Stomata verengen und dadurch der Gasaustausch mit der Umgebung limitiert ist, oder die Photosynthese lichtgesättigt ist (Strasburger, 1978). Daher sind Pflanzen mit C4-Photosynthese hauptsächlich in trockenen Gebieten mit starker Sonneneinstrahlung vertreten. Beispiele für C4-Pflanzen sind Mais und Rohrzucker.

Bei lokalen Simulationen mit eindimensionalen SVAT- Modellen (Anderson, 1997, Zhan, 2001) lässt sich der Vegetationstyp in der Regel aus der Beobachtung heraus angeben. Sollen Simulationen in der Fläche stattfinden, so ist eine Kartierung der Vegetationstypen für das angestrebte Simulationsgebiet unumgänglich. Diese kann aus Bestandsaufnahmen (z.B. aus der Forst- und Landwirtschaft) oder aus Fernerkundungsdaten wie Luftbilddauswertungen oder Satellitendaten abgeleitet werden. Globale und flächendeckende Vegetationsverteilungen können nur aus Satellitendaten abgeleitet werden, da in vielen Regionen keine andere flächendeckende und kontinuierliche Bestandsaufnahme gewährleistet ist. Nachteil hierbei ist, dass die einzelnen Vegetationsarten und -typen nicht mehr aufgelöst werden können. Wird beispielsweise ein Pixel als Laubwald klassifiziert, so kann keine Unterscheidung mehr getroffen werden, aus welcher Art von Laubbäumen er sich zusammensetzt (z.B. Buchen oder Eichen). Wichtig ist auch die angestrebte Auflösung. Je geringer die räumliche Auflösung ausfällt, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel mehrere unterschiedliche Vegetationstypen gleichzeitig

enthält, von denen nur die dominanteste bei der Klassifikation erkannt wird (Mischpixel). Dadurch nimmt die Genauigkeit der einer bestimmten Landbedeckungsart zugeordneten Fläche mit abnehmender räumlicher Auflösung ab.

Neben der Verteilung der Vegetation ist auch ihr Zustand für die Modellierung von Interesse. Laubbäume leisten z.B. nur während der Vegetationsperiode einen signifikanten Beitrag zur Evapotranspiration und zur CO₂-Assimilation und ändern während eines Jahres auch ihre Strahlungseigenschaften (Albedo, Transmission) und aerodynamischen (Oberflächenrauigkeit) Eigenschaften. Nadelbäume dagegen können bereits im Spätwinter bei ausreichender Sonneneinstrahlung signifikante Beiträge zur CO₂-Assimilation liefern. Weiterhin hat die Dichte des Bestandes vertikal und in der Fläche einen Einfluss auf den Strahlungsumsatz, die Verdunstung und den Stofftransport. Zwei oft verwendete Größen zur Beschreibung des Vegetationszustandes sind der Blattflächenindex (Leaf Area Index) LAI und die Blattflächendichte. Die Blattflächendichte ist die Blattfläche $a(z)$ im Höhenintervall $[z+\Delta z]$ eines Bestandes, normiert auf das Einheitsvolumen. Den LAI erhält man formal durch Integration der Blattflächendichte über die Bestandshöhe vom Boden bis zur Vegetationsobergrenze v_h :

$$LAI = \int_0^{v_h} a(z) dz \quad (2.1)$$

Abb. 2.1 zeigt als Beispiel die vertikale Verteilung der Blattflächendichte in einem Laubwald. Im bodennahen Bereich ist ein erstes Maximum der Blattflächendichte, bedingt durch das Vorhandensein von niedriger Sekundärvegetation zu erkennen. Die Blattflächendichte im Stammraum ist deutlich niedriger. Im Kronenraum des Bestandes wird die Blattflächendichte dann maximal. Die einfachste Parametrisierung eines Bestandes ist das sog. Big-Leaf-Konzept. Dieses geht von einer einfachen, homogenen Blattschicht aus, die im Maximum der Blattflächendichte gelegen ist. Verfeinerungen des Konzeptes sind die Verwendung des Bedeckungsgrades, der den Anteil der Vegetationsbedeckung in Prozent innerhalb einer Gitterbox angibt und die Diskretisierung des Bestandes in mehrere Vegetationsschichten.

Ein wichtiger zu berücksichtigender Prozess ist die Absorption von Strahlung im Bestand. Dies gilt zum einen in Bezug auf den Energieumsatz (Strahlungsbilanz), zum anderen in Bezug auf die zur Photosynthese zur Verfügung stehende Energie. Der für die Photosynthese wirksame Wellenlängenbereich des solaren Spektrums zwischen $0,4 \mu\text{m}$ und $0,7 \mu\text{m}$ wird als photosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetically Active Radiation, PAR) bezeichnet. Deren Absorption im Bestand (Fraction of Absorbed PAR, FAPAR) kann beispielsweise aus dem NDVI (s.u.) ermittelt werden (Sellers, 1996) oder durch

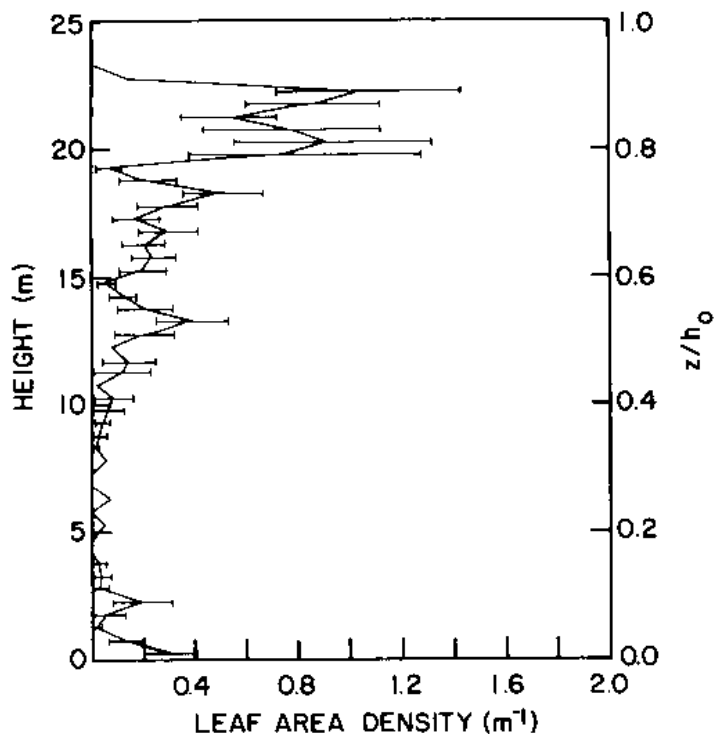


Abbildung 2.1: Vertikale Verteilung der Blattflächendichte in einem Laubwald (aus: Arya, 1985).

die Berechnung des Strahlungstransportes (Sellers, 1985, siehe Kap. 2.3.3., Gl. 2.21 und 2.22) im Bestand.

Eine weit verbreitete Kenngröße aus der Fernerkundung ist der NDVI (Preußner, 1998). Dieser ist eine normalisierte Differenz aus den Messwerten eines Messkanals im roten Wellenlängenbereich und eines Kanals im Nahinfrarot. ρ_{nir} ist die Reflektanz (das an der Erdoberfläche reflektierte und am Satellitensensor empfangene Sonnenlicht) im nahen Infrarotkanal, ρ_{red} die in einem roten Kanal.

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (2.2)$$

Der NDVI ist nicht nur vom Vegetationszustand sondern auch vom Vegetationstyp abhängig. Daher sollte zu einer Auswertung mittels NDVI-Daten auch immer die Landnutzung herangezogen werden. Weiterhin ist der NDVI abhängig vom Sensor. Daher können sich durch die Verwendung unter-

schiedlicher Sensoren verschiedene Werte des NDVI ergeben. Dies gilt es zu bedenken, wenn aus dem NDVI Vegetationsparameter wie LAI oder FAPAR berechnet werden sollen.

2.1.2 Photosynthese und Stomatakontrolle

Ein wichtiges Werkzeug in der Modellierung von Austauschprozessen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre ist das Widerstandskonzept (Garra, 1992). Analog zum elektrischen Widerstand wird die Flussdichte F einer Eigenschaft als Quotient aus einer (meist vertikalen) Differenz dieser Eigenschaft ψ und einem Widerstand r [s/m] gegen diese Flussdichte F angesehen:

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_0 \quad (2.3)$$

$$F = \frac{\Delta\psi}{r} \quad (2.4)$$

Die Koeffizienten zur Beschreibung der atmosphärischen Grenzschicht (turbulenter Diffusionskoeffizient) und des Bodens (Bodenwasser- und Wärmeleitfähigkeit) können in die Widerstände umgerechnet werden. Ein Beispiel dafür ist die Berechnung des turbulenten Austauschs zwischen Vegetation und der atmosphärischen Grenzschicht. Die turbulenten Flussdichten F einer Eigenschaft ψ in der Grenzschicht werden durch einen Gradientansatz beschrieben:

$$F = -K \frac{d\psi}{dz} \quad (2.5)$$

Die Proportionalitätskonstante K ist der turbulente Diffusionskoeffizient. Ein Beispiel ist die Parametrierung des fühlbaren Wärmeflusses H_0 [W/m^2]:

$$H_0 = -K \rho c_p \frac{dT}{dz} \quad (2.6)$$

mit dem vertikalen Temperaturgradienten dT/dz , der Dichte von Luft, ρ und der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck, c_p . Diskretisiert man den Gradienten durch die Temperatur- und Höhendifferenz, so kann man H_0 darstellen wie folgt:

$$H_0 = \rho c_p \frac{T_1 - T_0}{r_a} \quad (2.7)$$

mit

$$r_a = \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{K} dz \quad (2.8)$$

Da das Widerstandskonzept unterschiedliche Transportprozesse vergleichbar macht (z.B. turbulente und molekulare Diffusion zwischen Blatt und Atmosphäre), wird es häufig in der Mikrometeorologie verwendet. So können

die Transportwiderstände unterschiedlicher Prozesse analog zu elektrischen Widerständen in Reihe geschaltet werden, was die Kopplung der unterschiedlichen Systeme vereinfacht (Garrat, 1992).

Zentraler Punkt für die Erfassung von Austauschvorgängen zwischen Vegetation und Atmosphäre, ist die Beschreibung der Funktionalität der Blattöffnungen, der Stomata. Diese regulieren den Gasaustausch zwischen Pflanze und Umgebungsluft. Der Öffnungsgrad ist dabei eng verzahnt mit der Photosyntheseleistung. Bei hohen Photosyntheseraten sind die Stomata weit geöffnet, der Gasaustausch mit der Umgebung wird maximal. Steht die Vegetation unter Stress, z.B. durch Wassermangel, so tendieren die Stomata zum Schließen. Ein Maß für die Öffnung der Stomata ist der Stomatawiderstand: Sind die Stomata geschlossen, so ist dieser hoch und der Gasaustausch mit der Umgebung weitgehend unterbunden. Je weiter die Stomata geöffnet sind, desto geringer ist der Widerstand und desto intensiver der Austausch mit der Umgebungsluft. Zur Parametrisierung der Stomataöffnung und des damit verbundenen Gasaustauschs haben sich drei Ansätze etabliert: Der empirische Ansatz nach Dickinson (1984), ist speziell für den Austausch von Wasserdampf ausgelegt. Der Ansatz nach Monteith (1972) parametrisiert Photosynthese als lineare Funktion der Sonneneinstrahlung. Dagegen ist der Ansatz nach Farquhar (1980) und Collatz (1992, für C4-Pflanzen) eine sogenannte enzymkinetische Parametrisierung der Photosynthese. Die drei Ansätze sollen hier kurz vorgestellt werden:

Der Ansatz nach Dickinson (1984)

Dieser Ansatz, der in einer neueren Form auch bei Peters (2003) beschrieben ist, parametrisiert den Stomatawiderstand r_s mittels vier empirischer Funktionen und beschreibt nur den Austausch von Wasserdampf. Da die Berechnungen schnell und einfach durchzuführen sind, ist er vor allem dann von Vorteil, wenn den Ressourcen der Simulationen (z.B. in der operationellen Wettervorhersage) enge Grenzen gesetzt sind. Der Stomatawiderstand berechnet sich wie folgt:

$$r_s = \frac{r_{smin}}{F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4} \quad (2.9)$$

Die Funktionen F_1 bis F_4 beschreiben die Abhängigkeit der Stomataöffnung von den Umgebungsbedingungen der Vegetation und nehmen Werte im Intervall $]0,1]$ an. r_{smin} ist der minimale Stomatawiderstand, der vom Vegetationstyp abhängt und Werte zwischen 20 und 150 s/m annimmt. Der Widerstand des gesamten Bestandes r_c geht aus dem Stomatawiderstand r_s durch die

Skalierung mit dem Blattflächenindex LAI hervor.

$$r_c = \frac{r_s}{LAI} \quad (2.10)$$

Die Funktion F_1 beschreibt den Einfluss des Sonnenlichts auf die Öffnung der Stomata. Bei hoher solarer Einstrahlung und zunehmender Photosynthese werden die Stomata weiter geöffnet um den Gasaustausch mit der Umgebung zu erhöhen.

$$F_1 = \frac{r_{smin}/r_{smax} + f}{1 + f} \quad (2.11)$$

mit

$$f = 0,55 \frac{R_G}{R_{Gr}} \frac{2}{LAI} \quad (2.12)$$

r_{smax} ist ein vegetationsabhängiger maximaler Stomatawiderstand, f eine Parametrisierung der Photosynthese. R_G ist die Globalstrahlung und R_{Gr} ein vegetationsabhängiger Quotient der zwischen 30 und 100 W/m^2 liegt. $0,55 \cdot R_0$ ist der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung an der Globalstrahlung. F_2 beschreibt die Abhängigkeit der Stomataöffnung vom Bodenwassergehalt. Steht die Vegetation unter Wasserstress, so tendieren die Stomata zum Schließen. F_3 parametrisiert den Einfluss des Sättigungsdefizits der umgebenden Luft: Je trockener die Umgebungsluft ist, desto stärker schließen die Stomata, um ein zu starkes Austrocknen der Pflanzen zu verhindern. F_4 beschreibt die Abhängigkeit der Stomataöffnung von der Temperatur. Je weiter die Temperatur von einem vegetationsabhängigen Optimumswert T_{opt} abweicht, desto geringer ist die Stomataöffnung.

Mit diesem Ansatz lässt sich noch kein Austausch von CO_2 beschreiben, da die Photosynthese hier nur indirekt durch die dimensionslose Funktion f parametrisiert wird.

Der Ansatz nach Monteith (1972)

Der Ansatz von Monteith (1972) geht von der Annahme aus, dass die Assimilation von Kohlendioxid durch Photosynthese linear abhängig von der im Bestand absorbierten Strahlung ist. Dem liegt die Beobachtung zu Grunde, dass mit zunehmender Raumskala das eigentlich nichtlineare Verhalten der Photosynthese in eine lineare Abhängigkeit von der Lichtverfügbarkeit übergeht.

$$A_c = FAPAR \cdot LUE \quad (2.13)$$

Die Photosyntheserate A_c ($molCO_2 m^{-2} s^{-1}$) berechnet sich aus einer vegetationsabhängigen Konstante, der Lichtnutzungseffizienz (Light Use Efficien-

cy LUE) und der Lichtabsorption FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) im Bestand. LUE ist nicht nur vom Vegetationstyp sondern auch von der betrachteten Raum- und Zeitskala abhängig (Anderson et al. 2000). Die oben erwähnten Production Efficiency Models (PEM's) verwenden diesen Ansatz ohne eine explizite Modellierung des CO₂-Austausches mit der Atmosphäre. Der Einfluss von Temperatur- oder Wasserstress wird über Skalierungsfunktionen berücksichtigt (Goetz et al., 1999). Für eine vollständige Kopplung der Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und Vegetation muss jedoch die Abhängigkeit zwischen Stomata- bzw. Bestandswiderstand und Photosynthese hergestellt werden. Weiterhin ist eine Beschreibung des CO₂-Transportes notwendig. Der Bestandswiderstand R_c kann als Funktion der Photosyntheserate geschrieben werden (Anderson et al., 2000, Knorr, 1997):

$$\frac{1}{R_c} = b + m \frac{A_C \cdot RH_b}{C_b} \quad (2.14)$$

A_C ist die Photosyntheserate, b , m , C_b und RH_b sind Konstanten, die vom Vegetationstyp abhängen. Zusammen mit der Diffusionsgleichung für den Transport von CO₂ zwischen Blatt und Atmosphäre lässt sich der Austausch von CO₂ nun vollständig beschreiben.

$$A_C = 0,625 \frac{1}{R_c} (C_a - C_i) \frac{p}{RT_K} \quad (2.15)$$

C_a ist die CO₂ Konzentration in der Atmosphäre, C_i die interzelluläre CO₂ Konzentration, p der Luftdruck, R die allgemeine Gaskonstante und T_K die Lufttemperatur in K. Der Einfluss von Temperatur, Bodenwassergehalt und Sättigungsdefizit ist hier noch nicht berücksichtigt. Die Parametrisierung der Photosynthese ist rein lichtlimitiert. Die Auswirkungen von Wasserstress, Temperatur und Sättigungsdefizit auf den Bestandswiderstand können durch eine weitere Skalierung analog zum oben beschriebenen Ansatz nach Dickinson erfolgen (mit den Faktoren F_2 , F_3 und F_4). Vorteil dieses Modells ist, dass es eine Beschreibung des Bestandes liefert und daher keine Skalierung von der Blatt- auf die Bestandsebene nötig ist. Nachteil ist die unsichere Definition und Bestimmung der Lichtnutzungseffizienz.

Der Ansatz nach Farquhar (1980)

Der Ansatz von Farquhar (1980) ist eine sogenannte enzymkinetische Parametrisierung der Photosynthese. Die Photosyntheserate wird als das Minimum zweier Funktionen beschrieben: Einer durch den Elektronentransport

im Blatt limitierten, J_E und einer durch die Verfügbarkeit des für die Photosynthese wichtigen Enzyms Rubisco limitierten Photosyntheserate, J_C :

$$A_s = \min[J_C, J_E] - R_d \quad (2.16)$$

R_d ist dabei die sogenannte Blatt- oder Dunkelatmung und ein Teil der autotrophen Respiration (Gl. 1.1). Die Photosyntheserate auf Blattebene A_s ist dabei abhängig von der PAR-Absorptionsrate I_{PAR} und der Temperatur:

$$A_s = f(I_{PAR}, T) \quad (2.17)$$

Zu beachten ist hier, dass dieser Ansatz im Gegensatz zu dem von Monteith eine Beschreibung auf Blattebene darstellt. Zur Beschreibung der gesamten CO_2 -Assimilation ist daher eine Integration der Photosynthese und des Stomatawiderstandes auf den Bestand notwendig (siehe auch Kap. 2.3.4).

Der Ansatz liefert eine licht- und temperaturlimitierte Parametrisierung der Photosynthese, im Gegensatz zur nur lichtlimitierten Photosynthese im Ansatz nach Monteith. Die Parametrisierung der Abhängigkeit von Bodenwasserstress und Sättigungsdefizit erfolgt aber auch hier durch eine Skalierung des Stomatawiderstandes (z.B. durch die o.g. Faktoren F_3 und F_4). Vorteil gegenüber dem Ansatz von Monteith ist eine detaillierte Beschreibung der Photosynthese und die Abhängigkeit der Photosynthese von Licht und Temperatur. In Klimazonen mit ausreichender Wasserverfügbarkeit sind dies die limitierenden Größen der Photosynthese (siehe auch Nemani, 2003). Der Aufwand der Simulationen ist allerdings deutlich größer als beim Ansatz nach Monteith, da für die Berechnung der PAR-Absorptionsrate, der Strahlungstransport im Bestand detaillierter berücksichtigt werden muss und eine Integration von Blatt- auf Bestandsebene notwendig ist. Da der Ansatz in BETHY Verwendung findet, wird in der Modellbeschreibung noch näher darauf eingegangen.

2.2 Zur Wahl des Modells

Vegetationsmodelle gibt es in großer Anzahl und für die unterschiedlichsten Anwendungen. Durch die Ziele dieser Arbeit werden jedoch Rahmenbedingungen gesetzt, die die Auswahl einschränken. Eine Einschränkung ist die Simulationszeit. So darf die Zeitdauer der Simulation die simulierte Zeitskala nicht überschreiten. Soll beispielsweise der CO_2 -Austausch für einen Tag simuliert werden, so muss die Simulationszeit deutlich darunter liegen, da zusätzlich zur eigentlichen Simulation auch die Antriebsdaten des Modells prozessiert und die Ergebnisse archiviert werden sollen. Zusätzlich dazu

muss genügend Zeit bleiben, um im Falle von Ausfällen des Systems Fehler zu beheben oder es neu zu starten. Je mehr Prozesse in einem Modell integriert sind, desto länger wird jedoch die benötigte Simulationszeit. Da einer physikalischen Modellierung von NPP und NEP der Vorzug vor einer statistischen Simulation gegeben werden soll, muss ein Gleichgewicht zwischen dem zu erwartenden Simulationsaufwand und der Komplexität der Parametrisierungen gefunden werden. Die wichtigsten Prozesse, die das Modell umfassen soll, sind Photosynthese, Energie- und Wasserbilanz, der Austausch von CO_2 zwischen Vegetation und der atmosphärischen Grenzschicht und der Zustand der Vegetation. Als weiteres Kriterium kann die zu erfassende Zeitskala dienen: Modellzeitschritt und Gitter sollten mit den angestrebten Raum- und Zeitskalen der Ergebnisse übereinstimmen. Zur Simulation monatlicher und jährlicher Bilanzen ist es weiterhin notwendig, die tägliche Variabilität der Antriebsgrößen und des Austauschs zu berücksichtigen (Chen, 1999). Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass es im Laufe des Betriebs notwendig sein kann, Modellkomponenten zu verbessern oder auszutauschen, wenn damit die Qualität der Ergebnisse gesteigert wird. Daher sollte das zu wählende Modell modular aufgebaut und zu einer Kopplung mit anderen Modellen fähig sein.

Einfache PEM's, die nur mittels Gl. 2.13 ohne explizite Berücksichtigung der Austauschprozesse die NPP simulieren, (z.B. C-Fix, Veroustrate et al., 2002) fallen damit aus der engeren Auswahl, da hier nicht explizit die Wechselwirkungen zwischen den Systemen Boden, Vegetation und Atmosphäre berücksichtigt werden. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse von Anderson et al. (2000, physikalisch, Monteith-Ansatz mit vollständiger Kopplung) und Veroustrate et al. (2002, nur Monteith-Gl. 2.13, ohne Kopplung mit der Atmosphäre) ergab, dass der CO_2 -Austausch auf Tagesbasis mit einer vollständigen Kopplung des Austauschs zwischen Vegetation und Atmosphäre deutlich besser erfasst wird als mit einem Ansatz ohne Kopplung.

Detaillierte eindimensionale SVAT-Modelle wie ALEX (Anderson, 2000) liefern gute Ergebnisse der CO_2 -Assimilation und der Energiebilanz für einzelne Standorte, müssen aber dafür für einen operationellen Betrieb zu viele Vegetationsparameter berücksichtigen und benötigen zu lange Simulationszeiten für den angestrebten operationellen Betrieb.

Die Verwendung dynamischer Vegetationsmodelle ist deshalb problematisch, da diese vor allem auf Klimasimulationen ausgelegt sind. So arbeitet das LPJ (Sitch et al., 2003) mit einem Zeitschritt von einem Monat. Dies ist für die Simulation von Monats- und Jahreswerten der NPP und NEP zu lang.

Da die Bilanz eines Gebietes modelliert werden soll, ist es ein logistischer Vorteil, wenn das zu verwendende Modell bereits auf die Simulation dreidimensionaler Felder ausgelegt ist (Fläche und Zeit). Dadurch wird der Auf-

wand vermieden, das Modell falls nötig umstrukturieren zu müssen.

Die genannten Kriterien treffen auf das Vegetationsmodell BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Model) zu. Dieses wurde von Knorr (1997) am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena konzipiert. Es ist ein prozessbasiertes Modell, welches Energiebilanz, Wasserbilanz und Photosynthese berücksichtigt. Zur Berechnung der Strahlungsabsorption im Bestand wird dieser in drei Schichten diskretisiert. Zur Behandlung von Energiebilanz und Verdunstung findet ein Big-Leaf Konzept mit isothermer Behandlung von Bestand und Atmosphäre (Garratt, 1992) Verwendung. Die Evapotranspiration wird mit dem Ansatz von Penman-Monteith (Monteith, 1965) bestimmt, für die Bestimmung der Photosynthese findet ein kombinierter Ansatz nach Farquhar (1980) und Collatz (1992) Verwendung. Bodenwassergehalt und Wasserstress werden über ein einfaches Bucket-Modell und die Limitierung des Wassertransportes über die Wurzeln berücksichtigt.

BETHY war ursprünglich für globale Simulationen der NPP und NEP konzipiert. Die räumliche Auflösung ist variabel. Die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten liegt wahlweise bei Tages- oder Monatswerten (letztere werden in Tageswerte umgesetzt). In der vorliegenden Arbeit wurden Tageswerte als Eingangsdaten verwendet. Der Modellzeitschritt beträgt eine Stunde als Standardwert, d.h. die Tagesgänge von Temperatur, PAR und Wasserdampfdruck werden aufgelöst und die Variabilität der Tagesgänge berücksichtigt. Dafür werden Annahmen über typische Tagesgänge der Antriebsgrößen gemacht (s.u.). Photosynthese und Verdunstung werden stündlich berechnet, die Wasserbilanz täglich. GPP, NPP und NEP werden täglich, monatlich oder jährlich bilanziert. Mit BETHY kann weiterhin der Jahresgang der Phänologie (LAI) simuliert werden. Dazu wird der LAI als das Minimum einer temperatur-, bodenwasser- und wachstumsgesteuerten Phänologie angegeben. Eine Beschreibung ist bei Knorr (1997) zu finden. In der für diese Arbeit verwendeten Version von BETHY wird der Jahresgang des LAI allerdings nicht vom Modell gerechnet sondern als externer Antrieb vorgegeben.

2.3 BETHY: Parametrisierungen

2.3.1 Verteilung der Vegetationsparameter

Bei BETHY sind 23 Vegetationstypen mit ihren jeweiligen Parametern zur Berechnung der Photosynthese vorgegeben. Die geographische Verteilung der Vegetationsparameter im Simulationsgebiet kann durch eine Klassifikation

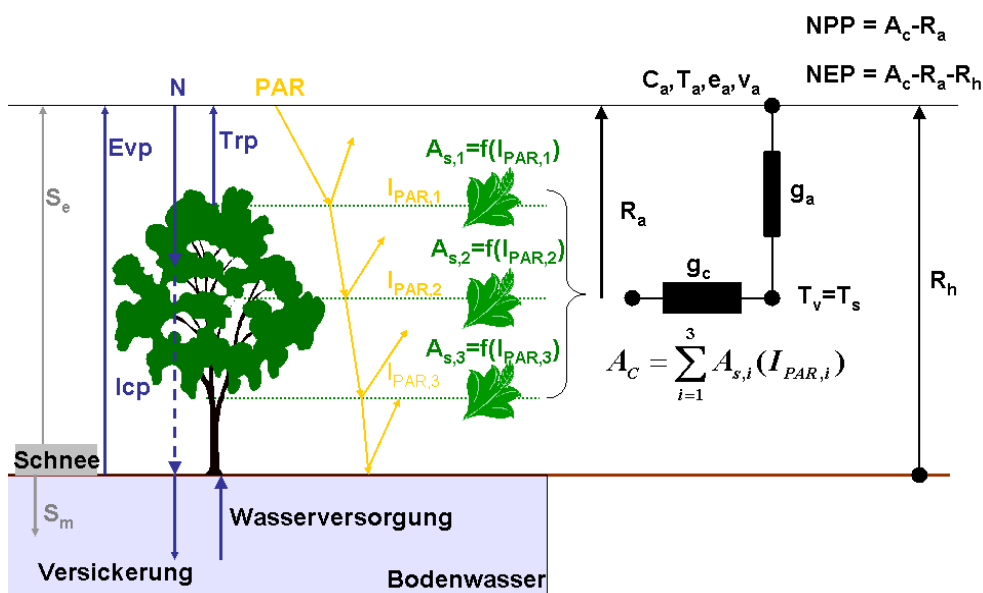


Abbildung 2.2: Einfaches Schema des Vegetationsmodells BETHY. Der Bestand wird in drei Schichten diskretisiert. Für jede Schicht i werden die Strahlungsabsorption $I_{PAR,i}$ und die Photosynthese $A_{s,i}$ berechnet. Die gesamte CO_2 -Assimilation A_C wird als Summe über die Bestandsschichten gebildet. Als atmosphärische Randbedingungen sind der CO_2 -Gehalt C_a , die Temperatur T_a , der Wasserdampfdruck e_a und die Windgeschwindigkeit v_a vorgegeben. Es wird angenommen, dass die Bestandstemperatur T_v gleich der Bodentemperatur T_s ist. Der Austausch wird mittels des Widerstandskonzeptes angegeben, wobei anstelle der Widerstände ihre Kehrwerte, die Leitfähigkeiten (g_c und g_a), verwendet werden. In die Bilanzierung des Bodenwasserhaushaltes gehen Niederschlag (N), Transpiration (Trp), Evaporation (Evp), Interzeption (Icp) und, falls vorhanden, Schmelzwasser (S_m) aus einer Schneedecke mit ein. Die Schneebilanz enthält weiterhin die Verdunstung über der Schneedecke (S_e).

der Landnutzung (Land Cover Classification, LCC) vorgegeben werden. Diese muss zuvor mit den in BETHY verwendeten Vegetationstypen abgeglichen werden. In dieser Arbeit werden von den 23 in BETHY möglichen Vegetationstypen 10 verwendet. Die verwendeten Typen und die dazugehörige Vegetationshöhe sind in Tabelle 2.1 angegeben. Für eine vollständige und detaillierte Beschreibung weiterer Parameter wird auf Knorr (1997) verwiesen.

Wie oben schon erwähnt, wird in der für diese Arbeit verwendeten Version der LAI nicht vom Modell berechnet, sondern muss als externer Antrieb vorgegeben werden. Der Zeitschritt der Phänologie wird daher von der zeitlichen

NUMMER	VEGETATIONSTYP	h_{veg} (M)
4	Temp. BL Deciduous Trees	15,0
5	Evergreen Coniferous Trees	15,0
7	Evergreen Shrubs	1,0
8	Deciduous Shrubs	1,0
9	C3 Short Gras	0,3
14	Swamp Vegetation	0,3
15	Arable Crops	0,6
16	Irrigated Crops	0,6
19	Temp. Deciduous Tree Crops	2,0
21	Maize (C4)	2,0

Tabelle 2.1: Die in dieser Arbeiten verwendeten Vegetationstypen und die ihnen zugeordnete Vegetationshöhe h_{veg} .

Auflösung der Eingangsdaten vorgegeben.

2.3.2 Meteorologischer Antrieb des Modells

Die wichtigsten meteorologischen Antriebsdaten sind Tageswerte der Strahlung, der Temperatur und des Niederschlags. Optional können zusätzlich Tagesmittel des Wasserdampfdruckes und der Windgeschwindigkeit vorgegeben werden. Die Tageswerte der Antriebsdaten werden von BETHY auf den Modellzeitschritt von einer Stunde herunterskaliert. Dies gilt nicht für den Niederschlag, da die Wasserbilanz täglich berechnet wird.

Der Tagesgang der Globalstrahlung, bzw. der PAR wird als skaliertes idealer Tagesgang aus dem Tagesmittel der Globalstrahlung $\overline{G_0}$ oder dem Tagesmittel des Verhältnisses r_{par} erzeugt.

$$r_{par} = \frac{\overline{PAR_{akt}}}{\overline{PAR_{pot}}} \quad (2.18)$$

Dabei ist $\overline{PAR_{akt}}$ das Tagesmittel der aktuellen PAR und $\overline{PAR_{pot}}$ das Tagesmittel der PAR bei unbewölktem Himmel (potentielle PAR).

Für den Tagesgang der Temperatur wird angenommen, dass dieser zwischen Sonnenauf- und -untergang einen sinusförmigen Verlauf annimmt. Nach Sonnenuntergang wird eine lineare Temperaturabnahme vorausgesetzt. Das Tagesminimum der Temperatur wird bei Sonnenaufgang erreicht, das Maximum bei 14 Uhr solarer Zeit. Ursprünglich wurde vorausgesetzt, dass die Tagesmitteltemperatur sich als Mittel aus dem Minimum und Maximum der Temperatur bestimmen lässt ($T_{mit} = (T_{min} + T_{max})/2$). Da sich jedoch herausstellte,

dass dieser Ansatz zu einer systematischen Unterschätzung der Tagesmitteltemperatur führt (Kapitel 4.7) wird diese in der vorliegenden Arbeit aus den meteorologischen Daten berechnet und als zusätzliche Antriebsgröße in das Modell eingelesen.

2.3.3 Wasser- und Energiebilanz

Der Bodenwassergehalt W_s wird täglich bilanziert. In ihn gehen der Niederschlag in Form von Regen oder Schneeschmelze ein sowie Wasserverluste durch die Evapotranspiration und den Abfluss:

$$W_s = P_s + P_v + S_m - E_t - E_s - \Phi \quad (2.19)$$

P_s ist dabei der Anteil des Niederschlags, der den Boden direkt erreicht, P_v der Anteil, der von der Vegetation abgefangen wird und dann zum Boden abtropft (Interzeption). S_m ist Schmelzwasser, falls eine Schneedecke vorhanden ist, E_t und E_s sind Transpiration (Verdunstung über die Vegetation) und Evaporation (Verdunstung des Bodenwassers). Φ ist der Abfluss, der als Residuum aus den anderen Größen berechnet wird. W_s darf den Wassergehalt bei der Feldkapazität, $W_{s,max}$, nicht überschreiten.

Ein Schwachpunkt des Modells ist das Fehlen einer Beschreibung des Bodenwärmehaushaltes. Dieser ist direkt mit dem Bodenwassergehalt gekoppelt, da der Anteil von Bodenluft und Bodenwasser die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Bodens bestimmt. Der Bodenwärmefluss kann daher von BETHY nur geschätzt (s.u.) werden.

Die Energiebilanz an der Oberfläche kann allgemein wie folgt geschrieben werden:

$$R_0 - H_0 - E_0 - G = 0 \quad (2.20)$$

Die Gleichung drückt die Energieerhaltung aus und besagt, dass an der Grenzfläche zweier Medien die Summe der Energieflussdichten (in W/m^2) gleich Null ist. An der Erdoberfläche balancieren sich Strahlung (Strahlungsbilanz R_0), Wärmeleitung im Boden (Bodenwärmefluss G) und die turbulenten Flussdichten fühlbarer und latenter Wärme in der Atmosphäre, H_0 und E_0 aus. Die Strahlungsbilanz R_0 lässt sich aufspalten in einen Anteil der Vegetation und einen Anteil am Boden.

$$R_{0,v} = (1 - t_{l,v})(R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - G) + a_v R_s \quad (2.21)$$

$$R_{0,s} = t_{l,v}(R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}) + a_s R_s + (1 - t_{l,v})G \quad (2.22)$$

$R_{L\downarrow}$ und $R_{L\uparrow}$ sind der abwärts und aufwärts gerichtete Anteil der langwelligen Strahlung, $t_{l,v}$ die langwellige Transmissivität der Vegetation. a_v und a_s

sind die Absorbtivität von Vegetation und Boden im kurzwelligen Bereich. Der Bodenwärmestrom G wird als konstanter Anteil der Nettostrahlungsbilanz parametrisiert (Stull, 1988). Es gilt $G = 0,036 \cdot R_0$. Weiterhin wird die Annahme gemacht, dass der Anteil $(1 - t_{l,v})$ des Bodenwärmestroms gleich der Wärmestrahlung von der Vegetation zum Boden ist. Dies ist eigentlich nur klimatologisch zulässig, da der Bodenwärmestrom je nach Wassergehalt, Vegetationsdichte und meteorologischen Rahmenbedingungen erheblich variieren kann.

Die Evapotranspiration wird nach dem Ansatz von Penman-Monteith berechnet. Bei BETHY findet anstelle des Widerstandes (siehe Gl.2.5) die Bestandsleitfähigkeit $G_c = 1/r_c$ Verwendung. Es wird zwischen „nassem“ und „trockenem“ Bestand unterschieden. Bei Benetzung der Vegetation durch Wasser infolge von Niederschlag oder Taubildung, erfolgt die Verdunstung direkt von der Blattoberfläche und ist nicht durch die Bestandsleitfähigkeit limitiert.

$$E_v = \frac{sR_{0,v} + \rho c_p (e_s(T) - e_a) G_a}{s + \gamma} \quad (2.23)$$

Ist dies nicht der Fall, der Bestand also „trocken“, so findet Verdunstung nur über die Stomata statt und die Transpirationsrate ist durch die Bestandsleitfähigkeit limitiert.

$$E_v = \frac{sR_{0,v} + \rho c_p (e_s(T) - e_a) G_a}{s + \gamma(1 + G_a/G_c)} \quad (2.24)$$

$R_{0,v}$ ist die Netto-Strahlungsbilanz an der Vegetation, γ die Psychrometernkonstante, $e_s(T)$ der Sättigungsdampfdruck, e_a der aktuelle Dampfdruck, s die Steigung der Dampfspannungskurve mit der Temperatur, ρ die Dichte von Luft und c_p die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck. Die aerodynamische Leitfähigkeit zwischen Bestand und Atmosphäre wird mit einem einfachen Ansatz von Brutsaert (1982) beschrieben:

$$G_a = \frac{\kappa^2 u}{[\ln(\frac{z-d}{z_0})]^2} \quad (2.25)$$

u ist die Windgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe über der Vegetation z . $\kappa = 0,41$ ist die von-Karman-Konstante, z_0 die Rauigkeitslänge und d die Verdrängungshöhe. Beide Größen hängen von der Höhe der Vegetation ab. Weiterhin wird bei BETHY die Verdunstung über Schnee berechnet, falls eine Schneedecke vorhanden ist und die Verdunstung über unbewachsenem Boden nach dem Modell von Ritchie (1972). Der fühlbare Wärmefluss H_0 wird bei BETHY aus dem Residuum der Energiebilanz bestimmt:

$$H_0 = R_0 - G - E_0 \quad (2.26)$$

2.3.4 Modellierung der Photosynthese

Photosynthese wird in BETHY mit einem kombinierten Ansatz nach Farquhar (1980) und Collatz (1992) berechnet. Die Photosyntheserate A wird als Minimum aus zwei Funktionen berechnet:

$$A = \min(J_C; J_E) - R_d \quad (2.27)$$

Die Einheit ist $\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. R_d ist die Dunkelatmung, J_C die durch das Enzym Rubisco und J_E die durch den Elektronentransport im Blatt limitierte Photosyntheserate. Im Fall von C3-Photosynthese findet der Ansatz von Farquhar Verwendung:

$$J_C = V_m \frac{C_i - \Gamma_*}{C_i + K_C(1 + O_x/K_O)} \quad (2.28)$$

$$J_E = J \frac{C_i - \Gamma_*}{4(C_i - 2\Gamma_*)} \quad (2.29)$$

J ist die Elektronentransportrate.

$$J = \frac{\alpha I J_m}{\sqrt{J_m^2 + \alpha^2 I^2}} \quad (2.30)$$

mit $I = I_{PAR}/E_{PAR}$ [$\text{mol}(\text{photonen})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$]. I_{PAR} ist die Absorptionsrate der PAR in W/m^2 und E_{PAR} der Energiegehalt eines PAR-Quants (220 kJ/mol). J_m und der CO_2 -Kompensationspunkt Γ_* sind von der Bestandstemperatur abhängig. C_i ist die aktuelle interzelluläre CO_2 -Konzentration. O_x , K_C und K_O sind Konstanten, deren Werte bei Knorr (1997) angegeben sind. Für C4-Photosynthese wird der Ansatz nach Collatz et al. (1992) verwendet:

$$A = \min(J_c; J_e) - R_d \quad (2.31)$$

$$J_c = kC_i \quad (2.32)$$

$$J_e = \frac{1}{2\theta_s} [V_m + J_i - \sqrt{(V_m + J_i)^2 - 4\theta_s V_m J_i}] \quad (2.33)$$

$$J_i = \alpha_i \frac{I_{PAR}}{E_{PAR}} \quad (2.34)$$

Zur Berechnung der PAR-Absorption im Bestand findet eine Zweistromapproximation nach Sellers (1985) Verwendung. Der Bestand wird dazu in drei Schichten diskretisiert. Die Photosyntheserate A wird für jede Bestandschicht berechnet und danach zu der gesamten CO_2 -Assimilation A_C aufintegriert:

$$A_C = \int_0^{LAI} A(l) dl \quad (2.35)$$

LAI ist der Blattflächenindex, l der differentielle Blattflächenindex der einzelnen Bestandsschichten. Es gilt $l=0$ an der Bestandsuntergrenze und $l=LAI$ an der Bestandsobergrenze. Zur Berechnung der Photosynthese wird zunächst eine nicht durch Wasserverfügbarkeit limitierte Photosyntheserate $A_0(l)$ für jede Vegetationsschicht berechnet. Dafür wird angenommen, dass die interzelluläre CO_2 -Konzentration $C_{i,0}$ ohne Wasserstress maximal ist ($C_{i,0} = 0,87C_a$ für C3- und $C_{i,0} = 0,67C_a$ für C4-Pflanzen). C_a ist die CO_2 Konzentration in der Atmosphäre. Diese wird konstant gehalten mit $C_a = 360$ ppm (Anmerkung: Bei Knorr, 1997, sind 355 ppm angegeben; im Quelltext des Modells ist jedoch $C_a = 360$ ppm). Mittels der unlimitierten Photosyntheserate und der Diffusionsgleichung für CO_2 zwischen Bestandsschicht und Atmosphäre

$$A_0(l) = 0,625G_0(l)(C_a - C_{i,0}) \frac{p}{RT_K} \quad (2.36)$$

wird nun eine unlimitierte Stomataleitfähigkeit durch Auflösen der Gleichung nach $G_0(l)$ ermittelt:

$$G_0(l) = \frac{1,6A_0(l)}{C_a - C_{i,0}} \frac{RT_K}{p} \quad (2.37)$$

Die unlimitierte Leitfähigkeit wird nun im Penman-Monteith Ansatz dazu verwendet, die potentielle Evapotranspiration $E_{t,max}$ zu berechnen. Um die Auswirkung von Wasserstress zu berücksichtigen, findet der Ansatz nach Federer (1979) Verwendung. Dieser besagt, dass die aktuelle Evapotranspiration sich als Minimum aus $E_{t,max}$ und einer maximalen Rate der Wasserversorgung (Supply Rate, S) bestimmen lässt:

$$E_t = \min(E_{t,max}, S) \quad (2.38)$$

Die aktuelle Bestandsleitfähigkeit G_C und mit ihr die aktuelle Evapotranspiration wird iteriert, bis diese Bedingung erfüllt ist. Mit der limitierten, aktuellen Leitfähigkeit wird nun die limitierte Photosyntheserate berechnet. Da in diesem Fall die interzelluläre CO_2 -Konzentration C_i unbestimmt ist, kann sie nicht mehr direkt im Ansatz von Farquhar und Collatz verwendet werden. Daher werden Gl. 2.28 und 2.29 nach C_i aufgelöst und in Gl. 2.36 eingesetzt. Daraus resultieren quadratische Gleichungen für J_C und J_E , deren Minimum der reellen Lösungen die aktuelle Photosyntheserate darstellt. Die Bestimmung der aktuellen Photosyntheserate $A(l)$ wird für jede Bestandsschicht durchgeführt und am Ende zur Gesamtassimilation A_C aufsummiert. Die Bruttoprimärproduktion GPP entspricht der über die Bestandsschichten summierten Photosyntheserate. In Abbildung 2.3 ist der Ablauf zur Berechnung der Photosynthese als Flussdiagramm dargestellt.

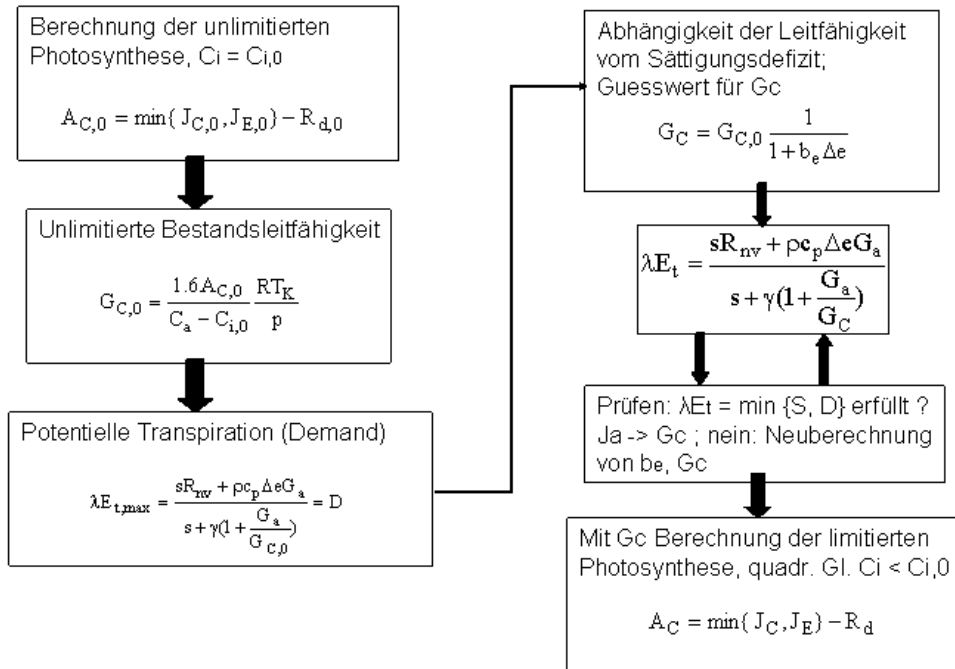


Abbildung 2.3: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Photosyntheseberechnung in BETHY. Zuerst werden die nicht limitierte Photosyntheserate und Bestandsleitfähigkeit berechnet. Damit ergibt sich eine potentielle Evapotranspiration. Daraus ergeben sich mit der Parametrisierung der Wasserverfügbarkeit nach Federer (1979) die aktuelle Evapotranspiration und die durch Wasserverfügbarkeit und Sättigungsdefizit limitierte Bestandsleitfähigkeit. Mit Hilfe dieser Größen wird nun die limitierte Photosyntheserate berechnet.

2.3.5 CO₂-Bilanz

Zur Schließung der CO₂-Bilanz muss die Atmung von Vegetation und Boden berücksichtigt werden. Die autotrophe Respiration R_A ist die Summe aus der Erhaltungsatmung (Maintenance Respiration), R_M und der Wachstumsatmung (Growth Respiration, R_G).

$$R_M = \frac{M_C R_{d,c}}{f_{R,leaf}} \quad (2.39)$$

M_C ist das Molekulargewicht von Kohlenstoff, $R_{d,c}$ die Dunkelatmung und $f_{R,leaf} = 0,14$ der Stickstoffanteil der Blätter an der gesamten Pflanze. Die Wachstumsatmung wird als fester Anteil $f_{R,G} = 0,25$ der NPP ermittelt:

$$R_G = f_{R,G} NPP = f_{R,G} (GPP - R_M - R_G) \quad (2.40)$$

Die NPP ergibt sich damit aus der GPP und der Erhaltungssatmung:

$$NPP = \frac{1}{1 + f_{R,G}}(GPP - R_M) \quad (2.41)$$

Für die Bodenatmung wird angenommen, dass ihre Jahreswerte in erster Näherung gleich der jährlichen NPP sind. Diese Annahme ist dann machbar, wenn in erster Linie die Saisonalität der NPP und NEP berücksichtigt werden soll (Knorr, 1997). Fehler ergeben sich aus dieser Annahme, wenn sich z.B. die Landnutzung während eines laufenden Simulationsjahres ändert.

Die Bodenatmung hängt von Temperatur und Bodenfeuchte ab. Die Wirkung der Bodenfeuchte wird in BETHY über das Verhältnis von aktueller zu potentieller Evapotranspiration $f_e = E_{akt}/E_{pot}$ berücksichtigt. Die Abhängigkeit von der Temperatur wird mit einem Faktor Q_{10} angegeben, der den Anstieg der Respiration bei einem Temperaturanstieg von 10°C beschreibt.

Damit ergibt sich die heterotrophe Respiration zu einem bestimmten Zeitpunkt zu:

$$R_h(t) = \frac{\int NPP(t')dt'}{\int f_e(t')Q_{10}^{\overline{T}(t')/10}} f_e(t)Q_{10}^{\overline{T}(t)/10} \quad (2.42)$$

2.3.6 Zusammenfassung

Zur operationellen Simulation der jährlichen und monatlichen CO_2 -Bilanz Europas am Deutschen Fernerkundungs-Datenzentrum (DFD) wurde ein Modell gesucht, dass die hierzu notwendigen Anforderungen erfüllt. Dies sind ein Zeitschritt von einem Tag und die Berücksichtigung der täglichen Variabilität und die zur quantitativen Erfassung des Austausches wichtige Kopplung von Photosynthese, Wasserhaushalt und Energiebilanz. Weiterhin sollten die erforderlichen Parametrisierungen nicht zu komplex und die Zahl ihrer Parameter begrenzt sein, um die Simulationszeit in Grenzen zu halten. Das Vegetationsmodell BETHY wurde als guter Kompromiss zwischen der Komplexität der Parametrisierungen und der bei hochaufgelösten Simulationen zu erwartenden hohen Rechenzeit gewählt. Es enthält die für den Austausch von CO_2 wichtige Kopplung zwischen Bodenwasserhaushalt und Photosynthese und Transpiration sowie eine einfache Parametrisierung des Austausches zwischen Bestand und Atmosphäre. Ein Nachteil ist die fehlende Kopplung zwischen Bodenwasser- und wärmehaushalt sowie die einfache Parametrisierung des Bodenwärmeflusses. Bei globalen Simulationen konnte BETHY seine Tauglichkeit bereits unter Beweis stellen (Knorr, 1997, 2001). Die Qualität der Modellergebnisse für regionale Studien soll in den nachfolgenden Kapiteln evaluiert werden.

Kapitel 3

Datengrundlage

Um das Ziel operationeller Simulationen der NPP und NEP über Europa zu erreichen (Kap. 1), müssen die zum Antrieb des Modells verwendeten Datensätze verschiedene Bedingungen erfüllen: Zum einen müssen sie das Simulationsgebiet vollständig abdecken. Weiterhin ist es notwendig, dass sie selber kontinuierlich vorliegen, wenn sie eine hohe zeitliche Dynamik aufweisen. D.h. die Datenversorgung muss über einen langen Zeitraum sichergestellt sein, damit die Simulationsergebnisse untereinander konsistent und vergleichbar bleiben. Ein Kriterium für diese Arbeit ist die angestrebte Evaluierung des Modells mit dem Datensatz CARBODATA, der Messdaten der Jahre von 1996 bis 2000 umfasst. Die hier verwendeten Datensätze sollten daher in diesem Zeitraum bereits vorliegen. Im folgenden Kapitel werden die in dieser Studie verwendeten Datensätze vorgestellt. Dies sind die PELCOM-Landklassifikation, monatliche LAI-Datensätze in 16 km Auflösung der Universität Boston und meteorologische Daten aus Analysen und Vorhersagen des ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast).

3.1 Landbedeckung

Um die große räumliche Variabilität der Vegetation nicht zu unterdrücken, sollten Landbedeckungsklassifikationen mit möglichst hoher Auflösung verwendet werden, da die Genauigkeit der Klassifikation mit geringer werdender Auflösung abnimmt. Weiterhin sollte die verwendete Klassifikation für eine operationelle Simulation nicht zu viele Klassen enthalten, da der Aufwand der Umsetzung in die von BETHY verwendeten Vegetationstypen sonst zu groß wird. So verwendet z.B. die CORINE-Klassifikation 49 Klassen der Landbedeckung, die in die von BETHY benutzten Vegetationstypen umgesetzt werden müssten. Die CORINE-Klassifikation hat weiterhin den Nach-

PELCOM-KLASSE	TYP 1	AT 1	TYP 2	AT 2
Nadelwald	IG Nadelbäume	0,8	C3-Kurzgras	0,2
Laubwald	Gemäßigte LA Laubbäume	0,8	LA Sträucher	0,2
Mischwald	Gemäßigte LA Laubbäume	0,5	IG Nadelbäume	0,5
Grasland	C3-Kurzgras	1,0	–	–
Ackerland	Getreide	0,7	Mais	0,3
Bewässertes Ackerland	Bewässerungskulturen	1,0	–	–
Permanenter Anbau	Gemäßigte Laubbaumkulturen	1,0	–	–
Strauchland	IG Sträucher	0,5	LA Sträucher	0,5
Feuchtgebiete	Sumpfv- Vegetation	0,8	C3-Kurzgras	0,2

Tabelle 3.1: Umsetzung der Landnutzung nach PELCOM in die bei BETHY verwendeten Vegetationstypen. Die Zuordnung orientiert sich an der NDVI-abgeleiteten Vegetationskarte, die in Knorr (1997) verwendet wird. LA: Laubabwerfend. IG: Immergrün. AT1,2: Flächenanteil Typ 1 und 2

teil, dass sie nicht für ganz Europa vorliegt. Daher bieten sich satellitenbasierte Klassifikationen auf Basis von Sensoren mit (für Satelliten) mittlerer Auflösung wie AVHRR oder MODIS an. Da die MODIS-Klassifikation erst seit dem Jahr 2000 vorliegt, fiel die Wahl auf die PELCOM-Klassifikation (Mücher, 2000). Diese basiert auf AVHRR-Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und wurde in Kooperation mehrerer europäischer Forschungsinstitute erstellt. Vorteil ist, dass damit zum ersten Mal eine vollständige europäische Klassifikation der Landnutzung vorliegt.

Die Klassifikation der Landbedeckung gibt noch nicht die Verteilung der Vegetationstypen und damit der Vegetationsparameter wieder (siehe Kapitel 2.1). Die Klasse Mischwald beinhaltet z.B. sowohl Laub- als auch Nadelbäume. Über den Anteil beider Vegetationstypen in dem entsprechenden Pixel kann keine Angabe gemacht werden. Konsequenz daraus ist, dass pro Vegetationspixel ein Haupt- und ein sekundärer Vegetationstyp verwendet werden sollte, deren Anteile im Pixel unterschiedlich gewichtet sind. Die Zuordnung in Tabelle 3.1 orientiert sich an der bei Knorr (1997) verwendeten

NDVI-basierter Karte. Aufgrund der mangelnden Informationen über die Verteilung der Vegetationstypen innerhalb einer Landnutzungs-kategorie, ist die Gewichtung der Primär- und Sekundärtypen mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Mit Hilfe von Sensitivitätsstudien lässt sich jedoch einschätzen, wie stark sich diese Unsicherheiten in den Ergebnissen auswirken (siehe Kapitel 4.6). Für die Kategorie Nadelwald bewirkt eine Ungenauigkeit von $\pm 20\%$ in den Anteilen der Vegetationstypen einen Fehler von 6 bis 9% in den Jahreswerten NEP. Dies wird als ausreichend angesehen. Schwerwiegender sind (wie in der Evaluierung gezeigt, siehe Kap. 5.3.3 und 5.5) Fehler aufgrund falscher Klassifikationen der Landbedeckung, z.B. wenn anstelle eines real vorhandenen Nadelwaldes Grasland klassifiziert wurde. In diesem Fall kann die NEP um einen Faktor 4,7 überschätzt werden (Kap. 5, Abbildung 5.26 bis 5.28 und Tabelle 2 im Anhang).

3.2 Vegetationszustand, Blattflächenindex

Für die in dieser Arbeit verwendete Version von BETHY wird der Blattflächenindex als externer Parameter benötigt. Voraussetzungen für die Eingangsdaten sind eine Auflösung des Jahresganges und, ebenso wie bei der Landnutzung, eine möglichst hohe räumliche Auflösung. Optimal wäre die Verwendung einer LAI-Zeitreihe, die unter Zuhilfenahme der zugrundeliegenden Landnutzung abgeleitet wurde. Dadurch werden Unstimmigkeiten zwischen den LAI-Daten und der Landnutzung vermieden. Beispielsweise ist es problematisch, wenn ein hoher LAI (z.B. $\text{LAI} = 6$), der in der ursprünglichen Herleitung einem Nadelwald entspricht, einer Landnutzungs-kategorie Ackerland im Frühjahr (z.B. kurz nach der Aussaat) zugeordnet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit sind den verwendeten Zeitreihen durch den angestrebten Simulationszeitraum Einschränkungen gesetzt. Da zur Validierung des Modells Stationsdaten verwendet werden sollen, die den Zeitraum von 1995 bis 2000 abdecken (vergl. Kap. 5), ist es sinnvoll, wenn die Antriebsdaten den entsprechenden Zeitraum abdecken. Die Wahl fiel daher auf die LAI-Zeitreihen der Climate and Vegetation Research Group der Universität Boston (Myneni et al., 1997). Diese basieren auf Messungen des AVHRR-Sensors, sind jedoch auf eine räumliche Auflösung von 16 km aggregiert um die Datenverfügbarkeit zu erhöhen. Die zeitliche Auflösung liegt bei einem Monat. Es wurde davon abgesehen, die LAI-Zeitreihen auf das höher aufgelöste PELCOM-Gitter zu interpolieren. Statt dessen wurden die LAI-Daten ohne räumliche Interpolation über das höher aufgelöste Gitter gelegt (gekachelt). In Hinblick auf die Konsistenz mit der verwendeten Landnutzungs-klassifikation und der Auflösung ist dieses Vorgehen nicht optimal. Daher ist die

Verwendung dieser Zeitreihen als Provisorium anzusehen. Aktuell wird am Deutschen Fernerkundungs-Datenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein Algorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe die dort bereits vorhandenen NDVI-Daten in LAI-Zeitreihen mit 1 km Auflösung umgerechnet werden. Basis hierfür ist die in dieser Arbeit verwendete PELCOM Klassifikation. Da die Arbeiten zu diesem Thema jedoch nicht abgeschlossen sind, können diese Daten nur in Form erster Tests in die vorliegende Arbeit einfließen (Kap.5.5.3).

3.3 Meteorologischer Antrieb

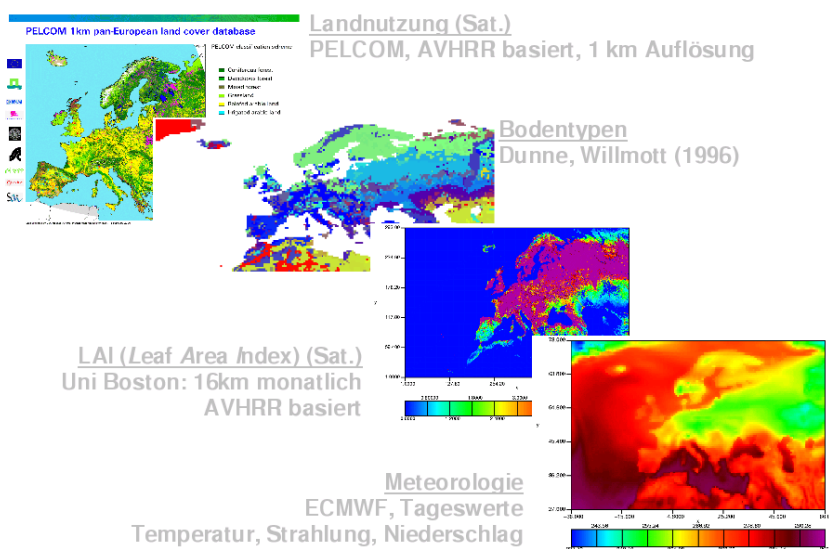


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der verwendeten Eingangsdatensätze. Landnutzung und LAI sind aus Satellitendaten gewonnene Größen.

Die meteorologischen Antriebsdaten gehen in Form von Tageswerten in das Modell ein und werden dort in Tagesgänge im internen Modellzeitschritt von einer Stunde umgesetzt. Das setzt voraus, dass im Simulationsgebiet täglich Daten von Temperatur, Strahlung, Niederschlag und ggf. Wasserdampf vorhanden sind. Meteorologische Daten werden operationell durch die

Messstationen der Wetterdienste erhoben und ausgetauscht. Sollen diese Daten Verwendung finden, dann müssen sie vorher auf das Simulationsgebiet interpoliert werden. Eine weitere Möglichkeit sind Modellanalysen. Operationelle meteorologische Modelle zur Wetterprognose ermitteln zu Beginn der Simulationen aus den Stationsdaten den Ist-Zustand und eine Modellvorhersage der atmosphärischen Felder in Modellauflösung.

Für diese Arbeit wurden Daten des ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast) verwendet. Die Analysefelder liegen alle 6 Stunden vor (0, 6, 12 und 18 UTC). Die räumliche Auflösung der Daten ist $0,5^\circ$. Falls möglich sollten nur Daten verwendet werden, die in den Modellanalysen vorhanden sind. Dies sind bei den bodennahen Feldern Temperatur und Taupunkt, Bewölkung und Bodenwassergehalt. Globalstrahlung und Niederschlag werden dagegen nur in den Vorhersagen gerechnet und sind daher um so unsicherer, je weiter sie sich vom Analysezeitpunkt entfernen.

Wie die LAI-Daten werden auch die meteorologischen Antriebsdaten nicht interpoliert sondern über das hochaufgelöste Gitter gekachelt. Nur die Temperaturwerte werden mit der Elevation des digitalen Höhenmodells ETOP05 in einer Auflösung von 5 km skaliert (Gl. 3.5, s.u.). Für die solare Einstrahlung am Boden würde sich eine Skalierung mit der Geländeneigung und der Neigungsrichtung anbieten. Leider enthält der ETOP05 Datensatz darüber keine Informationen.

BETHY lässt für den Strahlungsantrieb zwei Optionen zu: Die Verwendung von Tagesmitteln der Globalstrahlung oder von Tagesmitteln der photosynthetisch aktiven Strahlung, PAR. Genau genommen müssen potentielle (clear sky) und tatsächliche PAR oder Globalstrahlung verwendet werden, da mit Hilfe des Verhältnisses aus beiden Größen ein skaliertes Tagesgang von PAR und Globalstrahlung generiert wird. Zwei Möglichkeiten werden in dieser Arbeit getestet. Zunächst wird die Möglichkeit getestet, mittels der Bewölkung aus den ECMWF-Analysen die PAR abzuleiten. Dazu wird aus den Analysewerten der hohen, mittelhohen und tiefen Bewölkung das Tagesmittel für jedes Wolkenstockwerk gebildet. Zur Berechnung der Globalstrahlung R_G wird der Ansatz von Burridge und Gadd (1974, aus: Stull, 1988) verwendet:

$$T_r = (0,6 + 0,2 \sin(\gamma))(1 - 0,4\sigma_{cl})(1 - 0,7\sigma_{cm})(1 - 0,4\sigma_{ch}) \quad (3.1)$$

$$R_G = S_k \cdot T_r \cdot \sin(\gamma) \quad (3.2)$$

$$\sin(\gamma) = \sin(\phi)\sin(\delta) - \cos(\phi)\cos(\delta)\cos\left(\frac{\pi t_{utc}}{43200} - \Lambda\right) \quad (3.3)$$

$$\delta_s = \phi_r \cdot \cos\left(\frac{2\pi(\text{day} - d_r)}{\text{day}_y}\right) \quad (3.4)$$

S_k ist die Solarkonstante, T_r der Transmissionskoeffizient, $\sigma_{cl}, \sigma_{cm}, \sigma_{ch}$ sind die Bedeckungsgrade tiefer, mittelhoher und hoher Bewölkung, ϕ die geographische Breite, Λ die geographische Länge, ϕ_r die geographische Breite der Wendekreise ($23,45^\circ$), δ_s der aktuelle Inklinationwinkel, day der aktuelle Tag im Jahr, $d_r=173$ und $\text{day}_y=365,25$.

Mit diesem Ansatz und der mittleren Bewölkung wird ein skaliertes Tagesgang der aktuellen und potentiellen Globalstrahlung berechnet. Aus diesem werden die Tageswerte (Tagessumme oder -mittel) ermittelt und mit der empirischen Umrechnung $PAR = 0,48 \cdot R_G$ die PAR bestimmt.

Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung der Globalstrahlung aus den ECMWF-Vorhersagen. Dazu werden in dieser Arbeit nicht die operationellen Vorhersagen verwendet, sondern jene aus den ERA40-Reanalysen, d.h. die Datensätze sind reprozessiert. Die zugrundeliegende Überlegung dabei war, dass die Genauigkeit der operationellen Analysen ausreichen sollte, während für die Genauigkeit der Modellvorhersagen eine Steigerung durch die Reanalysen zu erwarten ist, da die aktuelle Modellversion verwendet wird und zusätzliche Datensätze mit einfließen. Die Globalstrahlung liegt in den Vorhersagen als Tageswert vor. Aus dem gleichen Datensatz werden auch die Tagessummen des Niederschlags verwendet.

Die Tageswerte der Temperatur werden als Mittelwert, Minima und Maxima aus den vier täglichen Analysewerten gebildet. Die Temperaturwerte werden zusätzlich mit der Differenz aus der ECMWF-Elevation und des mit 5 km höher aufgelösten digitalen Geländemodells ETOP skaliert:

$$T' = T + \Gamma \cdot (h_{ECMWF} - h_{ETOP}) \quad (3.5)$$

T' ist die skalierte Temperatur, h_{ECMWF} und h_{ETOP} sind die Elevationen der beiden Geländemodelle in Metern und Γ der Temperaturgradient der US-Standardatmosphäre mit $\Gamma = -0,0065 K/m$.

Der Bodenwassergehalt aus den ECMWF-Analysen wird als Startwert zur Initialisierung von BETHY verwendet. Aus dem volumetrischen Bodenwassergehalt in den vier Schichten des ECMWF-Bodenmodells wird ein mittlerer Bodenwassergehalt für jeden Analysezeitpunkt bestimmt; aus den vier Werten pro Tag das Tagesmittel. Dieses wird in den Anteil pflanzenverfügbaren Bodenwassers umgerechnet, der in BETHY als Bestimmungsgröße für den

Bodenwassergehalt verwendet wird.

In Abbildung 3.1 sind die zum Antrieb des Modells verwendeten Datensätze schematisch dargestellt.

Kapitel 4

Sensitivitätstests

Bevor ein Modell verwendet wird, muss bekannt sein, wie sich Unsicherheiten in Eingangsvariablen und Randbedingungen auf die Modellergebnisse auswirken. Eine Einschätzung der Unsicherheiten ergibt sich aus Sensitivitätsstudien. Globale Sensitivitätsstudien wurden mit BETHY bereits von Knorr (1997) durchgeführt. Da in der vorliegenden Arbeit eine andere Modellversion verwendet wird, ist eine Ergänzung dieser Studien sinnvoll. So beträgt die Auflösung der Simulationen bei Knorr 1° . Weiterhin wurden als meteorologischer Antrieb Monatsmittel von Temperatur, Niederschlag und Sonneneinstrahlung verwendet. Getestet wurden u.a. die Auswirkungen des verwendeten Photosynthesemodells (Monteith und Farquhar), der verwendeten Landbedeckungskartierungen, die Wurzeltiefe, die Parametrisierung des turbulenten Austauschs zwischen Vegetation und Atmosphäre (Gl. 2.25) und die in der vorliegenden Arbeit nicht benötigten Parameter zur Berechnung der Phänologie. Als größte Unsicherheitsfaktoren wurden die Parametrisierung der autotrophen Respiration und das verwendete Photosyntheschema identifiziert. Weiterhin hat die verwendete Wurzeltiefe einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse während die Sensitivität bezüglich des turbulenten Austausches als gering identifiziert wurde.

Da die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells in dieser Arbeit höher ist (Tageswerte des meteorologischen Antriebs und 1 km räumliche Auflösung), ist eine Ergänzung der globalen Studien sinnvoll. So kann bei einer räumlichen Auflösung von 1 km nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Bedeutung der Parametrisierung des turbulenten Austausch minimal ist, da mit zunehmender Auflösung lokale Effekte für die Erzeugung von Turbulenz (Oberflächenrauigkeit, lokal unterschiedliche Aufheizung der Landoberfläche) an Bedeutung gewinnen.

Zur Durchführung der meisten Tests wurde BETHY als Punktversion mit Stationsdaten der CARBOEUROPE Stationen Vielsalm und Tharandt be-

Station	Koordinaten	Elevation	Vegetationstyp	LAI	Bestandshöhe
Tharandt (TH)	50,97 N 13,57 W	380 m	Picea Abies	7,6	26,5 m
Vielsalm (VI)	50,30 N 6,00 W	450 m	Fagus syl- vatica	4,5	27 - 35m

Tabelle 4.1: Die wichtigsten Standortparameter, der für die Sensitivitätstests verwendeten Stationen Tharandt und Vielsalm.

trieben. Eine Ausnahme davon bilden die Tests für die Parametrisierung der Tagesgänge. Diese wurden zu Beginn der Arbeit mit Stationsdaten der BOREAS-Messkampagne durchgeführt. Eine Beschreibung findet sich in dem entsprechenden Unterkapitel 4.7. Die Wahl dieser beiden Stationen orientiert sich an den Simulationen zur Evaluierung des Modells (Kap. 5). Die Station Tharandt befindet sich westlich von Dresden in einem alten Fichtenbestand und wurde gewählt, weil hier der längste Datensatz zur Verfügung steht (von 1996 bis 2000). Vielsalm liegt in Belgien in einem Mischwald mit Rotbuchen als dominanter Spezies. Die Station Vielsalm wurde gewählt, weil auch die Zuweisung der Vegetationstypen zu den Landbedeckungsarten getestet werden soll und diese Station als einzige nicht in einem Nadelwald aufgestellt ist. Leider sind für Vielsalm nur Zeitreihen von zwei Jahren verfügbar (1997 bis 1998). Um den Vergleich zu erleichtern, wird daher von den Ergebnissen der Station Tharandt ein Mittelwert gebildet. Die wichtigsten Eigenschaften der Standorte sind in Tab. 4.1 zusammengefasst. Für die Tests wurden die Antriebs- und Randwerte um eine angenommene Ungenauigkeit von +/-10% und +/-20% variiert. Die Variation der entsprechenden Parameter findet sich in Tabelle 4.2.

4.1 Initialisierung des Bodenwassergehaltes

Der Bodenwassergehalt zählt zu den Größen, die von BETHY prognostisch gerechnet werden. Daher ist es notwendig, ihn zu Beginn der Simulation zu initialisieren, d.h. mit einem Startwert zu versehen. Da Daten des Bodenwassergehaltes nicht flächendeckend vorliegen, ist dieser unbekannt. Daher können die Modellergebnisse nicht direkt vom Modellstart an verwendet werden. Erst wenn die Simulationsergebnisse nicht mehr vom Anfangszustand des Modells abhängen, können sie zur Auswertung verwendet werden. Der erste Test dient dazu, die Dauer dieser Einschwingphase (Spin up) herauszu-

Parameter (Station)	Defaultwert (falls zeitunabhängig)	absolute Variation [±10% (20%)]
CO ₂ -Randwert (TH+VI)	360 ppm	+/- 36 (76) ppm
Wind-Randwert (TH+VI)	3 m/s	+/- 0,3 (0,6) m/s
Gewicht 1. Veg. Typ (TH)	0,8	+/- 0,08 (0,16)
Gewicht 1. Veg. Typ (VI)	0,5	+/- 0,05 (0,10)
LAI (TH)	7,6	+/- 0,76 (1,52)
LAI (VI)	4,5	+/- 0,45 (0,90)
Startwert Bodenwasser	250 mm	+/- 25 (50) mm
Niederschlag (TH+VI)	Zeitreihe	Zeitreihe

Tabelle 4.2: Standardwerte der in den Sensitivitätstests untersuchten Rand- und Antriebswerte und ihre absoluten Abweichungen bei einer Variation um ±10% bzw. 20%.

finden. Dazu wird der Startwert des Bodenwassergehaltes bei der Simulation variiert. Untersucht wird, ab welchem Zeitpunkt sich der simulierte Bodenwassergehalt der Testläufe nicht mehr unterscheidet, und wie stark sich die Unterschiede in den Jahreswerten der NEP widerspiegeln. In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die Zeitreihen des pflanzenverfügbaren Bodenwassergehaltes Θ in mm für die fünf Startbedingungen dargestellt. Bei der Simulation für den Standort Vielsalm gleichen sich die Zeitreihen ab etwa 200 Tagen an. Dies ist aber auch dadurch bedingt, dass der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt in diesem Zeitraum für alle Simulationen gleich Null wird. Für die Simulation am Standort Tharandt beträgt die Einschwingphase etwa 400 Tage. Schaut man sich die Tabellen der Jahreswerte der simulierten NEP an (Tab. 4.3), so sieht man, dass sich für beide Stationen schon während des zweiten Simulationsjahres die Jahreswerte der NEP nicht mehr signifikant unterscheiden. Daher wird für die weitere Arbeit eine Einschwingphase des Modells von einem Jahr verwendet.

4.2 Blattflächenindex

Der Blattflächenindex (LAI) ist eine entscheidende Antriebsvariable für die Photosynthese und den Energie- und Stoffaustausch mit der Umgebung. Mit einem höheren LAI ist eine höhere Photosyntheserate zu erwarten. Allerdings ist diese Abhängigkeit nicht linear sondern geht mit zunehmenden Werten des LAI in Sättigung (Monteith, 1976). Wie zu erwarten steigt mit zunehmendem Blattflächenindex auch die NEP an. Bei einer Änderung des Blattflächenin-

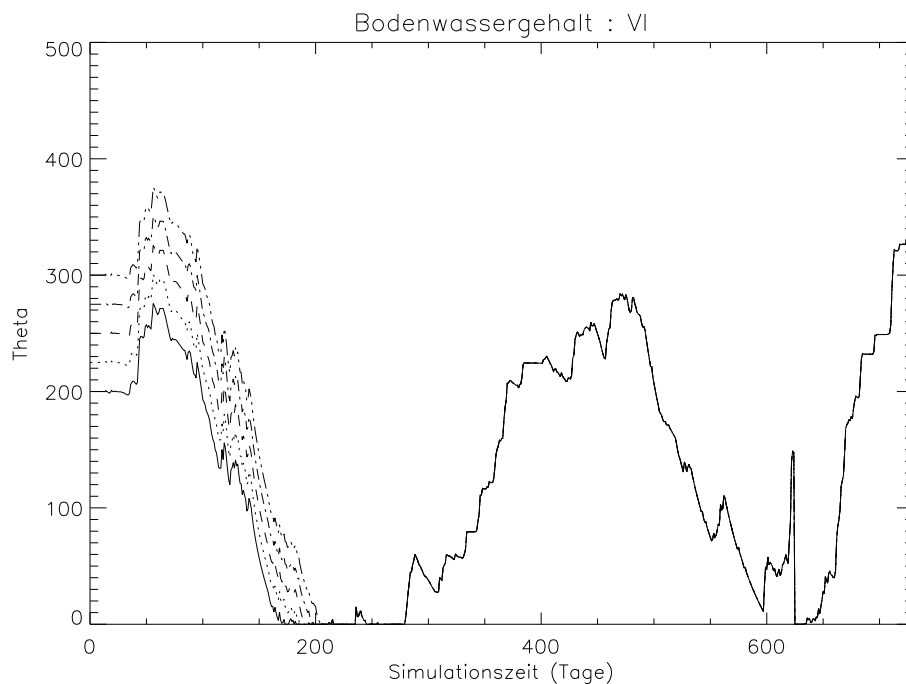


Abbildung 4.1: Simulierter Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassergehaltes [mm] der Station Vielsalm mit den fünf verschiedenen Startwerten. Die Startwerte sind von oben nach unten: Ref.+20%, Ref.+10%, Ref., Ref.-10% und Ref.-20%

dex von +/-20% ist eine Änderung der NEP von ca. +/-8 bis +/-16% zu erwarten. Dass die Änderungen der NEP mit zunehmendem LAI fast linear verlaufen (speziell für Tharandt) liegt daran, dass die Werte des Referenzlaufes mit 4,5 (Vielsalm) und 7,6 (Tharandt) schon recht hoch liegen und die Abhängigkeit der Assimilation von CO_2 vom LAI in diesem Wertebereich keine stark exponentielle Abhängigkeit mehr besitzt. In Tabelle 4.4 sind die absoluten Abweichungen der NEP für die Station Vielsalm und als Mittelwert aus vier Simulationsjahren der Station Tharandt zusammengefasst.

4.3 Niederschlag

Wichtigster Input für den Bodenwasserhaushalt ist der Niederschlag. Dabei wirkt eine Vergrößerung bzw. Verringerung des Niederschlagsantriebs in zwei verschiedene Richtungen. Eine Vergrößerung des Inputs z.B. bewirkt einerseits eine bessere Wasserversorgung der Vegetation und verringert den Wasserstress. Damit ist eine Steigerung der Photosyntheserate und damit der NEP zumindest für Zeiträume zu erwarten, in denen die Wasserversor-

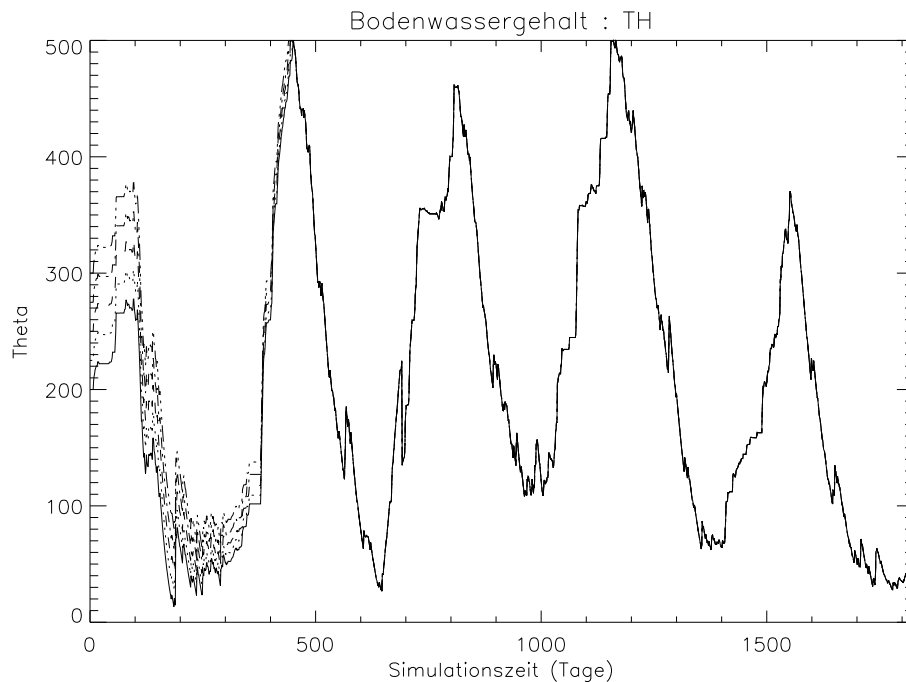


Abbildung 4.2: Simulierter Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassergehaltes [mm] der Station Tharandt mit fünf verschiedenen Startwerten

gung potentiell kritisch ist (in mittleren Breiten also eher im Sommer). Ein höherer Bodenwassergehalt bewirkt aber auch eine Steigerung der heterotrophen Respiration, da diese von der Temperatur und dem Bodenwassergehalt abhängt. Mit einer höheren Respiration wird die NEP wieder geringer. Daher kann zunächst nicht eindeutig gesagt werden, ob mit einer Erhöhung des Niederschlagsangebotes eine Erhöhung oder Verringerung der NEP zu erwarten ist. Für die Tests wurden alle Tageswerte des Niederschlags um 10% (20%) vergrößert, bzw. verkleinert. Tabelle 4.5 zeigt die Änderung der NEP bei Variation der täglichen Niederschlagssummen. Für Tharandt ergibt sich ein Absinken der NEP mit zunehmendem Niederschlag bei einer fast gleichbleibenden GPP (1657,70 gC/m²/Jahr für -20% Niederschlag und 1657,90 gC/m²/Jahr für +20%). Offensichtlich überwiegt in diesem Fall der Effekt der heterotrophen Respiration über die Wirkung des Bodenwassergehaltes auf die Photosynthese. Bei der Station Vielsalm ergibt sich ein qualitativ ähnliches Ergebnis mit einem nochmaligen leichten Anstieg der NEP beim Test mit +10%. Dies ist nicht ohne weiteres erklärbar und kann in der Nicht-linearität der Prozesse begründet liegen.

INITIALISIERUNG DES BODENWASSERGEHALTES					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	250 mm	+10%	+20%
1996	761	755	749	744	739
1997	913	913	913	913	913
1998	766	766	766	766	766
1999	753	753	753	753	753
2000	958	958	958	958	958
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	250 mm	+10%	+20%
1997	882	878	875	871	868
1998	607	607	607	607	607

Tabelle 4.3: Jahreswerte der NEP [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation des Startwertes für den pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt. Dargestellt ist die vollständige Simulation ohne Spin-Up (Einschwingphase). In der Mitte steht der Wert des Referenzlaufes, die anderen Spalten für die Abweichungen der Startwerte vom Referenzlauf

4.4 Randbedingung: Windgeschwindigkeit

Für die Windgeschwindigkeit lässt BETHY zwei Optionen zu: Sie wird entweder über den gesamten Zeitraum der Simulation konstant gehalten, oder kann als Tagesmittelwert aus einem externen Datensatz vorgegeben werden. In dieser Arbeit wird die erste Option gewählt. Die Windgeschwindigkeit geht direkt in die Berechnung der aerodynamischen Leitfähigkeit ein (Gl. 2.28) und beeinflusst damit den Austausch von CO_2 und Wasserdampf. Eine höhere Windgeschwindigkeit im Referenzniveau bewirkt eine höhere Windscherung und damit eine stärkere turbulente Durchmischung in der Grenzschicht. Das wiederum erhöht die Leitfähigkeit. Eine höhere Leitfähigkeit lässt eine stärkere Evapotranspiration in die Atmosphäre zu und reduziert damit den Bodenwasserhaushalt. Das sollte wiederum die Photosyntheserate einschränken aber auch (siehe Niederschlag) die heterotrophe Respiration vermindern. Welcher Effekt überwiegt, lässt sich auch hier nicht ohne einen Test sagen. Bei Knorr (1997) ergaben sich nur minimale Unterschiede. Die unterschiedliche Auflösung der Modelle in der Arbeit von Knorr und in der vorliegenden (1° bei Knorr gegenüber 1 km hier) erfordert jedoch einen neuen Test der Auswirkungen. Für diesen Test wurde die Windgeschwindigkeit

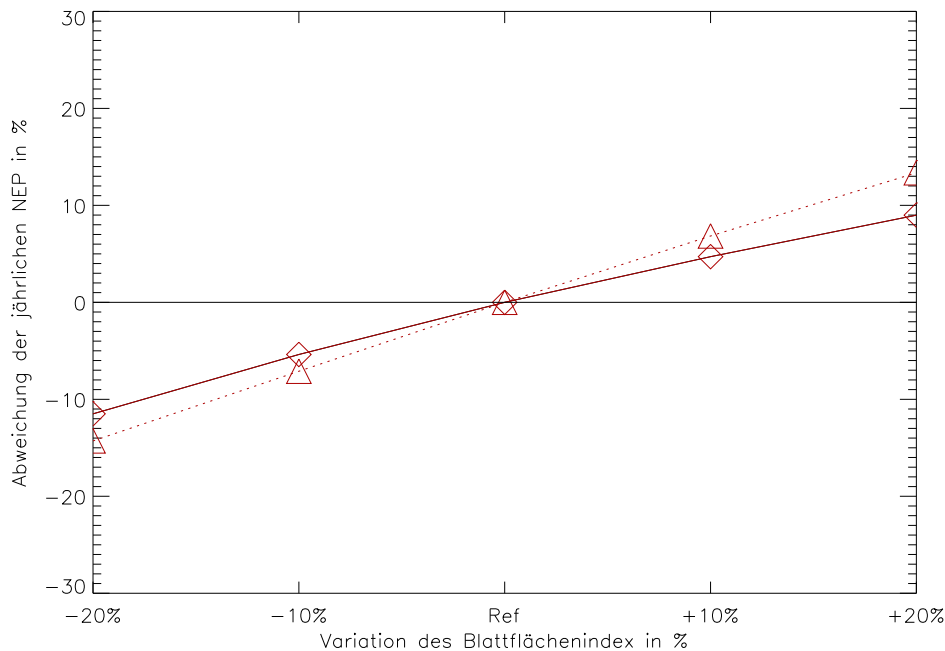


Abbildung 4.3: Relative Änderung der NEP bei der Variation des LAI um $\pm 10(20)\%$ für die Stationen Vielsalm (Rauten) und Tharandt (Dreiecke).

des Referenzlaufes von 3 m/s um $\pm 10(20)\%$ variiert. Wie Abbildung 4.5 zeigt, sind die Auswirkungen auf die Jahreswerte der NEP minimal. Bei einer Variation der Randbedingung um $\pm 20\%$ variiert die NEP nur um ca. 2%. Daher kann bei den weiteren Simulationen darauf verzichtet werden, die Windgeschwindigkeit als externen Datensatz einzulesen.

4.5 Randbedingung: CO₂-Konzentration

Zur Simulation der CO₂-Assimilation wird als Randbedingung der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre benötigt. Dieser wird in BETHY als konstanter Randwert vorgegeben. Da der CO₂-Gehalt jedoch in Wirklichkeit ausgeprägte Tages- und Jahresgänge aufweist (siehe Abb. 5.3, S. 65), ist eine Fehlerabschätzung für den Einfluss dieses Wertes sinnvoll. Eine höhere CO₂-Konzentration wirkt sich über die Diffusionsgleichung für CO₂ (Gl. 2.38) auf die Photosyntheserate aus. Auf die potentielle (nicht durch die Wasserverfügbarkeit limitierte) Photosyntheserate hat dies keinen Einfluss, da die hierzu gehörige interzelluläre CO₂-Konzentration linear von der atmosphärischen Konzentration abhängt (Kap. 2.3.4). Bei der Berechnung der

BLATTFLÄCHENINDEX					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	LAI=7,6	+10%	+20%
Ø 4 Jahre	726	787	847	905	961
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	LAI=4,5	+10%	+20%
1998	537	574	607	636	662

Tabelle 4.4: Jahreswerte der NEP [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation des LAI. Für Tharandt dargestellt ist der Durchschnittswert der Simulationsjahre 1996 bis 2000. LAI ist der Blattflächenindex des Referenzlaufes.

unlimitierten Photosyntheserate sollte sich der Konzentrationsunterschied aber bemerkbar machen, da C_i in diesem Fall nicht mehr konstant ist. Die CO_2 -Konzentration hat offensichtlich starke Auswirkungen auf das Simulationsergebnis (Tab. 4.7). Mit zunehmender Konzentration steigen auch die Jahreswerte der NEP fast linear an. Beim Test mit um -20% verringerter CO_2 -Konzentration ist die NEP ebenfalls um rund 20% geringer. Zu höheren Werten hin flacht die Kurve leicht ab, bei einer Erhöhung der Konzentration um 20% ist die NEP aber immer noch um rund 15% erhöht. Für zukünftige Arbeiten sollte daher falls möglich auch die aktuelle Konzentration des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes als externer Modellantrieb verwendet werden.

4.6 Gewichtung der Vegetationstypen Laub- und Nadelwald

Jeder Landbedeckungsklasse der PELCOM-Klassifikation werden ein primärer und ein sekundärer Vegetationstyp zugeordnet (siehe Kapitel 3.1). Bis auf die Klasse Mischwald, in die Anteile beider Typen (Nadel- und Laubbäume) gleich stark gewichtet sind und die Klassen Grasland, bewässertes Ackerland und permanenter Anbau, denen nur ein einzelner Vegetationstyp zugeordnet ist, überwiegt der Anteil der primären Vegetation im betrachteten Pixel. Die Gewichtung der Vegetationstypen ist jedoch nicht aus den Eingangsdaten ableitbar. Daher muss überprüft werden, wie sich Ungenauigkeiten in der Gewichtung der Vegetationstypen auf die Simulationsergebnisse auswir-

NIEDERSCHLAG					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	N_d	+10%	+20%
Ø 4 Jahre	890	864	847	834	822
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	N_d	+10%	+20%
1998	625	621	607	624	607

Tabelle 4.5: Jahreswerte der NEP [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation der Tageswerte des Niederschlags N_d . Für Tharandt dargestellt ist der Durchschnittswert der Simulationsjahre 1996 bis 2000.

ken. Da die Station Tharandt in einem Nadelwald aufgestellt ist, wurde ihr für diesen Test die Landbedeckung Nadelwald zugeordnet und entsprechend Kapitel 3.1 (Tabelle 3.1) die Vegetationstypen Nadelbäume und C3-Gras zugewiesen. Der Standort der Messstation in Vielsalm dagegen liegt in einem Mischwald, der entsprechenden Landbedeckungsklassen sind die Vegetationstypen Nadelbäume und Laubbäume zugeordnet. Für diesen Test wird eine lineare Änderung der NEP als Ergebnis erwartet, da auch die Gewichtung der Vegetationsanteile bei der Berechnung der Assimilation linear ist. Für eine Änderung der Gewichtungen der Landnutzungsklassen von $\pm 20\%$ ergibt sich eine Änderung in der jährlichen NEP von ca. $\pm 10\%$ an der Station Vielsalm und ca. $\pm 6\%$ für die Station Tharandt. Die Unsicherheit durch die Gewichtung der Vegetationstypen liegt damit etwa bei der Hälfte der Unsicherheit, die durch eine konstante CO_2 -Randbedingung entsteht und etwa in der gleichen Größenordnung der Unsicherheit, die durch eine falsche Einschätzung des LAI hervorgerufen wird. Die Sensitivitäten für die Gewichtung der Vegetationstypen sind streng genommen nur für die hier getesteten Landbedeckungsklassen Nadelwald und Mischwald gültig. Tests mit weiteren Landbedeckungsklassen sollten durchgeführt werden, sobald für diese Messergebnisse zur Verfügung stehen.

4.7 Parametrisierung der Tagesgänge

Den meteorologischen Antrieb für BETHY in der vorliegenden Modellversion bilden Tageswerte der solaren Einstrahlung (PAR oder Globalstrahlung) und

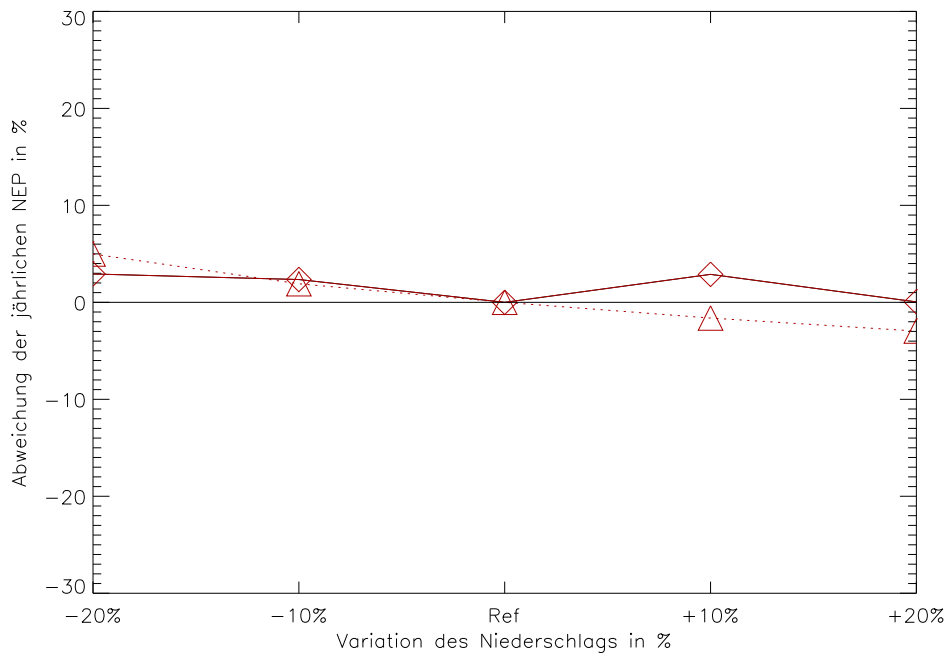


Abbildung 4.4: Relative Änderung der NEP bei der Variation des täglichen Niederschlagsinputs um $\pm 10(20)\%$ für die Stationen Vielsalm (Rauten) und Tharandt (Dreiecke).

der Temperatur. In BETHY werden die Tagesgänge mit einem Zeitschritt von einer Stunde (Defaultwert) aufgelöst. Damit ergeben sich zwangsläufig Abweichungen der Antriebswerte vom realen Verlauf. Ein realer Tagesgang der solaren Einstrahlung weist z.B. bei bewölktem Himmel einen mehr oder weniger schnellen Wechsel zwischen hohen und niedrigen Werten auf. Die in BETHY parametrisierten Tagesgänge sind dagegen stetig. Da Photosynthese nicht linear von der Einstrahlung abhängt (Monteith, 1976), kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich der Einfluss des Lichtwechsels im Mittel heraushebt. Das Gleiche gilt für den Verlauf der Temperatur. Um zu überprüfen, welchen Effekt die Parametrisierung der Tagesgänge auf die Ergebnisse hat, wurden zu Beginn der Arbeit Sensitivitätstests mit Stationsdaten der BOREAS-Messkampagne (Newcomer et al., 2000) durchgeführt. Ein weiteres Ziel war es, die Auswirkungen unterschiedlicher Zeitschritte der Eingangsdaten auf die Berechnung der Tageswerte zu untersuchen. Die BOREAS-Kampagne fand von 1994 bis 1996 in Kanada statt, mit dem Ziel, den Kohlenstoffkreislauf in borealen Waldsystemen zu quantifizieren. Von den sogenannten MESONET-Stationen, die die wichtigsten meteorologischen

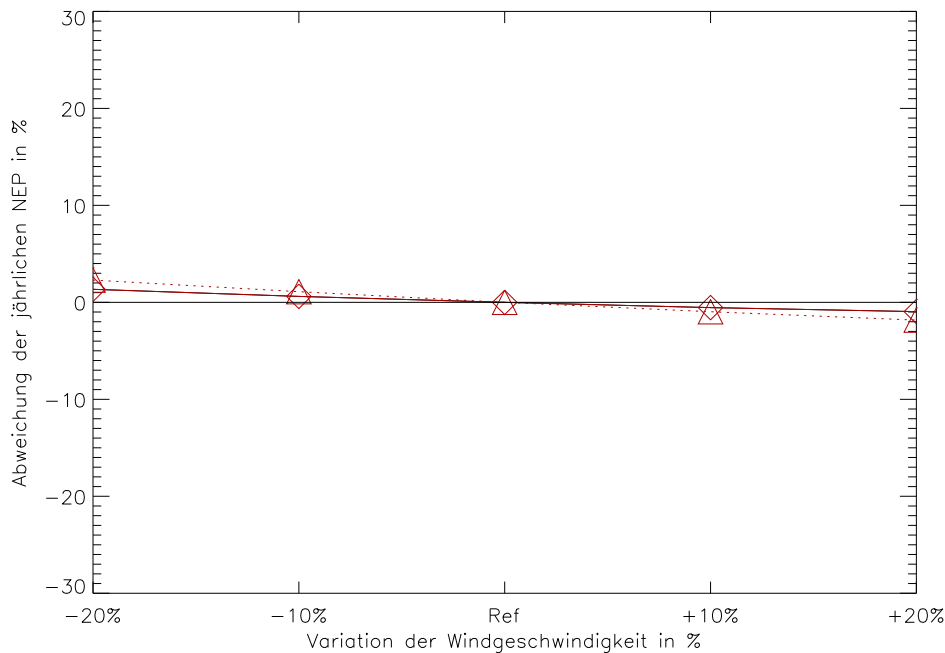


Abbildung 4.5: Relative Änderung der NEP bei der Variation der Randbedingung für die Windgeschwindigkeit um $\pm 10(20)\%$ für die Stationen Vielsalm (Rauten) und Tharandt (Dreiecke).

Daten in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten liefern, wurde die Station Thompson Airport ausgewählt, da sie den höchsten Datenbestand für das betrachtete Simulationsjahr 1994 aufweist. Die Station liefert keine Daten über die CO_2 -Flüsse oder -Konzentrationen, was hier nicht weiter stört, da keine Validierung des Modells durchgeführt werden sollte. Für den Blattflächenindex wurde ein konstanter Wert von 4 für das gesamte Jahr angenommen. Vegetationstyp an der Station ist Nadelwald. Als Vorbereitung für die Tests wurde der Zeitschritt der Originaldaten reduziert auf 30, 60, 120 und 180 Minuten. Es wurden keine Mittelwerte über diese Zeitschritte gebildet, um die Auswirkungen des Zeitschritts der Messungen auf die Tageswerte von PAR und Temperatur, sowie die Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse untersuchen zu können. Aus den Originaldaten in 15-minütiger Auflösung und den fünf Datensätzen mit reduzierter zeitlicher Auflösung wurden dann die Tageswerte der Antriebsdaten gebildet.

Mit den Stationsdaten in viertelstündlicher Auflösung wurde zunächst ein Referenzlauf durchgeführt. Die 15-minütigen Werte von PAR, Temperatur

WINDGESCHWINDIGKEIT					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	v=3 m/s	+10%	+20%
Ø 4 Jahre	867	857	847	839	832
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	v=3 m/s	+10%	+20%
1998	615	611	607	604	601

Tabelle 4.6: Jahreswerte der NEP [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation der Windgeschwindigkeit. Für Tharandt dargestellt ist der Durchschnittswert der Simulationsjahre 1996 bis 2000. v ist die Windgeschwindigkeit im Referenzlauf.

und Wasserdampfdruck wurden dafür direkt in das Modell eingelesen, dessen Zeitschritt für diesen Test auf 15 Minuten heruntersetzt wurde. Für die Tests wurden die Tageswerte von PAR, Temperatur und Wasserdampfdruck, die aus den Datensätzen mit unterschiedlicher Zeitaufösung gewonnen wurden, zum Antrieb des Modells verwendet. In der für diesen Test verwendeten Modellversion von BETHY wurde die Tagesmitteltemperatur modellintern aus dem Tagesminimum und -maximum der Temperatur ermittelt: $T_{mit} = (T_{min} + T_{max})/2$ (siehe Knorr, 1997). In Abbildung 4.8 sind die relativen Abweichungen der Jahreswerte von NPP und PAR für die verschiedenen Tests dargestellt. Der Zeitschritt, in dem die Originaldaten vorliegen, hat einen nur geringen Einfluss auf die Jahreswerte von NPP und der PAR. Die jährliche NPP wird durch die Parametrisierung der Tagesgänge generell überschätzt, mit Abweichungen von 8,4 bis 9,4%. Die Jahreswerte der PAR weisen ebenfalls eine leichte Überschätzung zwischen 2,1 und 2,9% auf mit einem leichten Anstieg zu langen Zeitschritten hin. Abbildung 4.9 zeigt die absoluten Abweichungen der PAR-Tageswerte vom Referenzfall für einen Ursprungszeitschritt von 180 Minuten. Dargestellt ist auch das gleitende Mittel über die Abweichungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Überschätzung der PAR überwiegt. In einzelnen Fällen können die Abweichungen $\pm 2 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{Tag}$ betragen. Abbildung 4.10 zeigt die relativen Abweichungen der PAR vom Referenzfall. Die Abweichungen sind in Frühjahr und Winter am höchsten, eine ausgeprägte Saisonalität ist jedoch nicht zu erkennen. An einzelnen Tagen sind Abweichungen von $\pm 20\%$ möglich, im gleitenden Mittel liegen sie zwischen 10 und 20%. Im Gegensatz zur PAR wird die Tagesmitteltemperatur, die vom Modell mittels der Beziehung $T_{mit} = (T_{min} + T_{max})/2$

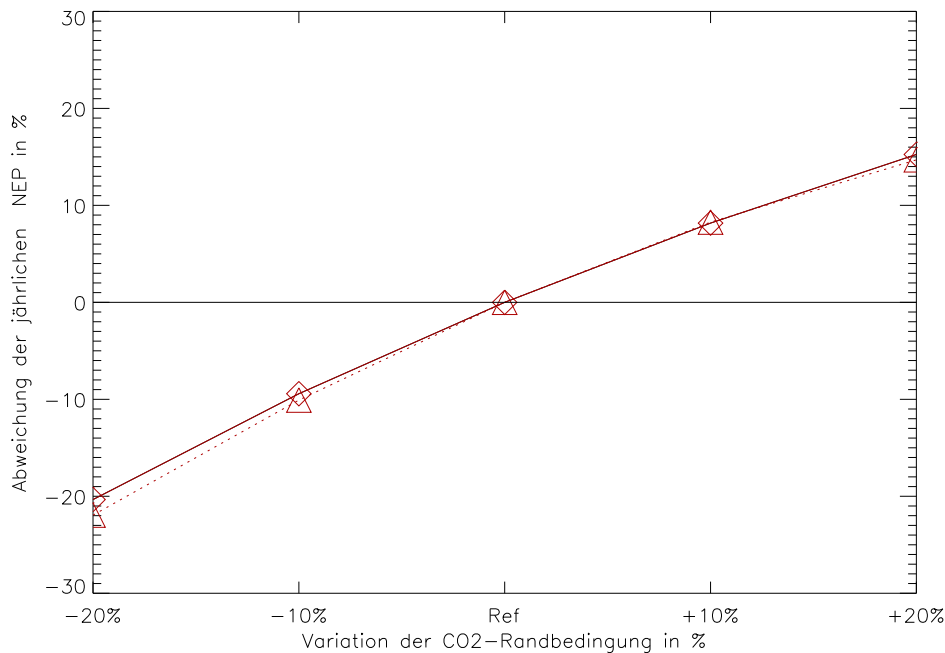


Abbildung 4.6: Relative Änderung der NEP bei der Variation der Randbedingung für die CO₂-Konzentration um +/-10(20)% für die Stationen Vielsalm (Rauten) und Tharandt (Dreiecke).

berechnet wird, fast ausschließlich unterschätzt (Abbildung 4.11). Die Abweichung vom Referenzwert beträgt im Jahresmittel $-0,72^{\circ}\text{C}$ für den Test mit 15 Minuten Zeitschritt und $-0,79^{\circ}\text{C}$ für den Test mit 180 Minuten Zeitschritt. Als Konsequenz daraus wird die Tagesmitteltemperatur in dieser Arbeit nicht mehr mit der o.g. Beziehung vom Modell bestimmt. Statt dessen wird sie aus den vorhandenen Temperaturdaten berechnet und als externe Antriebsvariable vorgegeben.

Abbildung 4.12 und 4.13 zeigen die absolute und relative Abweichung der modellierten Tageswerte der NPP vom Referenzlauf. Insgesamt überwiegen die Überschätzungen. Die absoluten Abweichungen weisen außerdem einen ausgeprägten Jahrgang auf, mit einem Maximum der Überschätzung im Sommer. Im Winter sind die Differenzen verschwindend gering. Die relativen Abweichungen liegen über die Sommermonate in der gleichen Größenordnung mit Werten um 10%. Hier treten die größten Abweichungen im Winter auf, was aufgrund der geringen solaren Einstrahlung und der damit ebenfalls geringen Werte der NPP verständlich ist. Die relativen Abweichungen der Tageswerte können in den Wintermonaten über 50% betragen. Der Ein-

CO ₂ -KONZENTRATION					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	C=360 ppm	+10%	+20%
Ø 4 Jahre	661	762	847	917	972
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	C=360 ppm	+10%	+20%
1998	484	550	607	657	700

Tabelle 4.7: Jahreswerte der NEP [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation der CO₂-Randbedingung. Für Tharandt dargestellt ist der Durchschnittswert der Simulationsjahre 1996 bis 2000. C ist die CO₂-Konzentration des Referenzlaufes.

fluss auf die Gesamtbilanz ist jedoch durch die geringen Absolutwerte gering. Abbildung 4.14 zeigt die gleitenden Mittel der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten NPP-Tageswerten für die Tests mit 15 und 180 Minuten Zeitschritt der Ursprungsdaten. Qualitativ sind beide Kurven fast identisch. Mit 15 Minuten Originalzeitschritt sind die Differenzen leicht größer als mit 180 Minuten, allerdings nicht über den gesamten Zeitraum. Der Effekt der zeitlichen Auflösung (Sampling der Originaldaten) kann daher als vernachlässigbar angesehen werden.

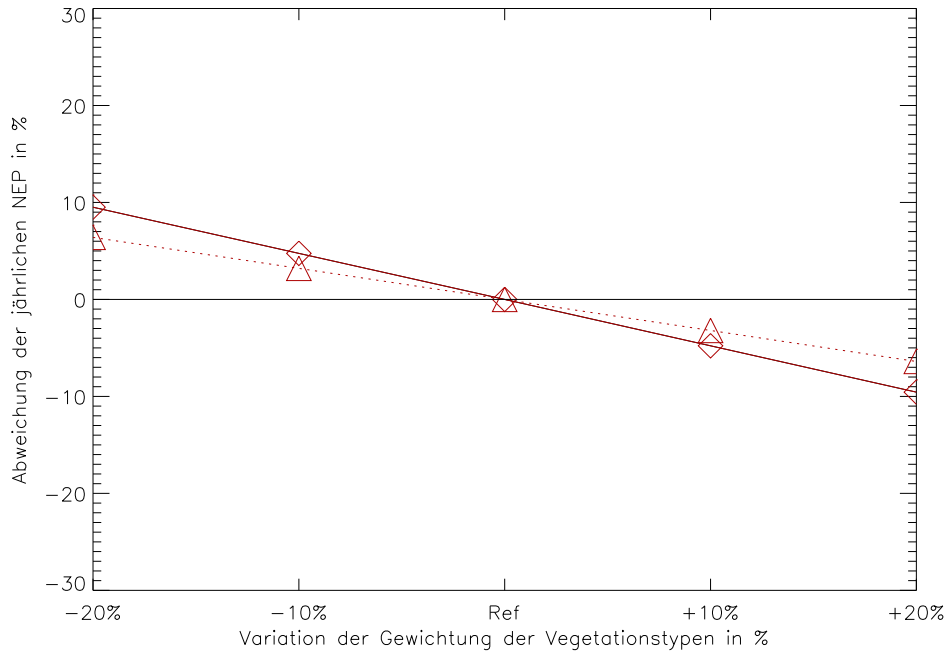


Abbildung 4.7: Relative Änderung der NEP bei der Variation der Gewichtung des ersten Vegetationstypes um +/-10(20)% für die Stationen Vielsalm (Rauten) und Tharandt (Dreiecke).

GEWICHTUNG DER LANDNUTZUNGSKLASSEN					
NEP STATION THARANDT					
Jahr	-20%	-10%	G=0,8	+10%	+20%
Ø 4 Jahre	902	874	847	820	793
NEP STATION VIELSALM					
Jahr	-20%	-10%	G=0,5	+10%	+20%
1998	665	636	607	578	549

Tabelle 4.8: Jahreswerte der NEP [gC/m²/Jahr] für die Simulationen an den Stationen Vielsalm und Tharandt und die Variation der Gewichtung des primären Vegetationstypen. G ist die Gewichtung des ersten Vegetationstyps im Referenzlauf. Für Tharandt dargestellt ist der Durchschnittswert der Simulationsjahre 1996 bis 2000.

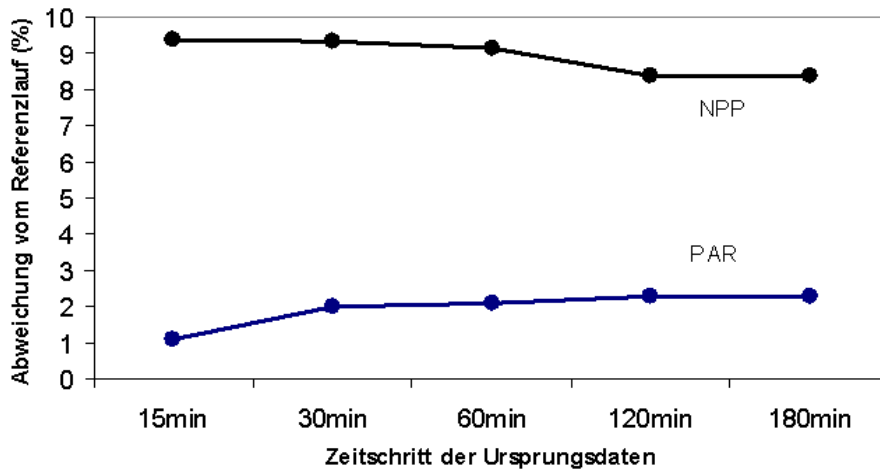


Abbildung 4.8: Relative Abweichungen der Jahreswerte von NPP und PAR vom Referenzfall. Die relativen Abweichungen weisen eine nur geringe Abhängigkeit vom Zeitschritt der Ursprungsdaten auf.

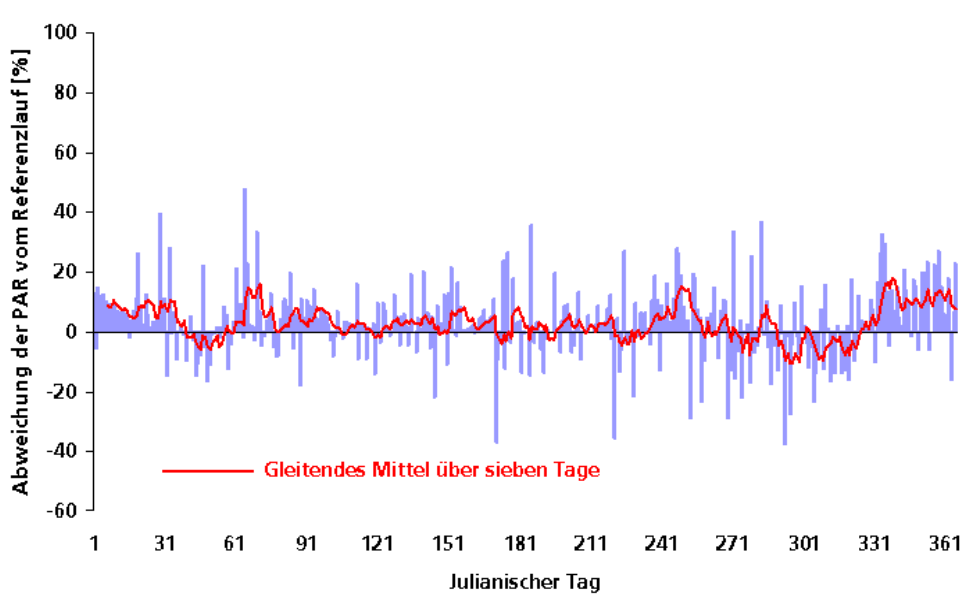


Abbildung 4.9: Relative Abweichung der PAR-Tagessummen, die aus Stationsdaten im Zeitschritt von 180 Minuten gewonnen wurden. Zusätzlich zu den Tageswerten ist ein gleitendes Mittel der Abweichungen über sieben Tage dargestellt

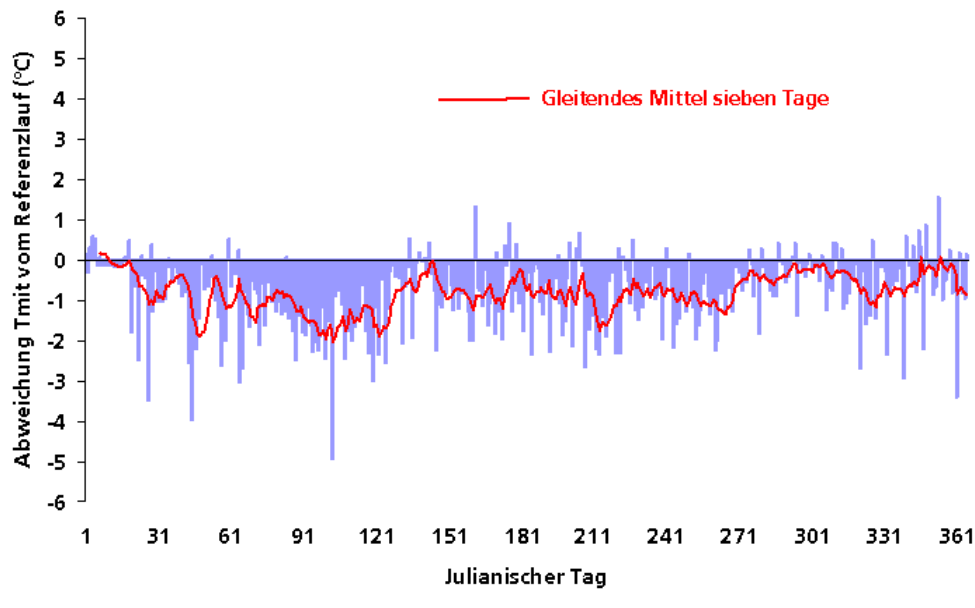


Abbildung 4.10: Absolute Abweichung der vom Modell berechneten Tagesmitteltemperatur vom Referenzfall für den Test mit 180 Minuten Zeitschritt der Ursprungsdaten. Dargestellt sind die Differenzen der Tageswerte und das gleitende Mittel der Abweichungen.

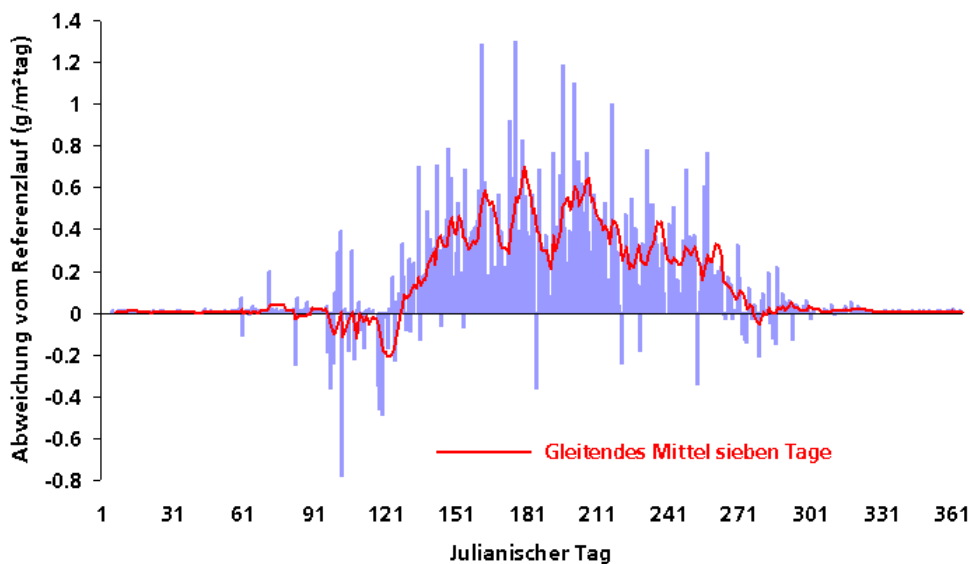


Abbildung 4.11: Absolute Abweichung der modellierten NPP vom Referenzlauf für den Test mit 180 Minuten Zeitschritt der Ursprungsdaten. Dargestellt sind die Differenzen der Tageswerte und das gleitende Mittel der Abweichungen.

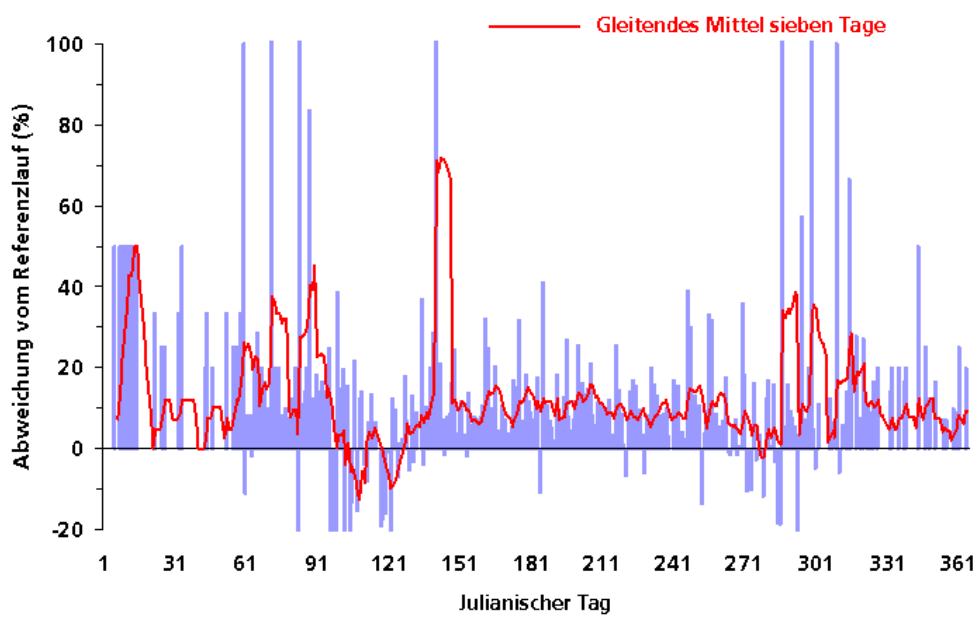


Abbildung 4.12: Relative Abweichung der modellierten NPP vom Referenzlauf für den Test mit 180 Minuten Zeitschritt der Ursprungsdaten. Dargestellt sind Abweichungen der Tageswerte und das gleitende Mittel der Abweichungen.

Kapitel 5

Evaluierung des Modells

Vor der Durchführung der regionalen Simulationen soll festgestellt werden, wie gut die simulierten Werte der NEP mit Messdaten übereinstimmen. Für die NPP und die GPP ist dies nicht ohne weiteres möglich, da die Respiration (vor allem die heterotrophe) nicht direkt gemessen und die GPP nur modelliert werden kann. Daher werden in diesem Fall nur die gemessene und die modellierte NEP verglichen. Es soll außerdem überprüft werden, wie gut die zur weiteren Verwendung angestrebten meteorologischen und phänologischen Datensätze für die flächenhafte Modellierung mit Messergebnissen übereinstimmen und wie groß die Abweichungen sind, die sich aus der Verwendung dieser Datensätze gegenüber den Daten der Messstationen ergeben.

5.1 Daten und Stationen

Zur Evaluierung des Modells werden Daten des CARBOEUROPE Stationsnetzwerkes verwendet. Kern dieses Projektes ist ein Zusammenschluss von Stationen, die europaweit CO₂-Flüsse über Beständen messen und so Informationen über die Quellen, Senken und Speicher von CO₂ liefern sollen. Für diese Arbeit wurde der Datensatz CARBODATA (Valentini, 2000) verwendet, der einen Zeitraum von 1996 bis 2000 umfasst. Die Messungen werden mit der Eddy-Kovarianz Technik durchgeführt. Eine umfassende Beschreibung der Messung turbulenter Flussdichten mit dieser Technik findet sich bei Grünwald (2003). Aus den hochfrequenten (10 und 20,8 Hz) Messungen der Eddy-Kovarianz-Sensoren werden Halbstundenwerte gebildet. Diese werden für den CARBODATA-Datensatz weiterhin zu Tages-, Wochen-, Monats-, und Jahreswerten zusammengefasst. Ein Nachteil der Eddy-Kovarianz-Methode ist, dass eine sinnvolle Auswertung nur bei bestimmten atmosphärischen Bedingungen möglich ist (Stationarität). Weiter-

hin ist der Einfluss der Advektion von CO_2 auf die Messergebnisse zu beachten. Bei schwach turbulenten Bedingungen kann der Transport von CO_2 durch Advektion gegenüber dem lokalen Austausch überwiegen. Aus diesem Grund werden Messphasen mit schwach ausgeprägter Turbulenz von der Auswertung ausgeschlossen. Um eine kontinuierliche Zeitreihe der CO_2 -Bilanz zu erhalten, müssen daher die Datenlücken aufgefüllt werden. Dies kann z.B. so geschehen, dass zunächst mit den auswertbaren Messungen die Parameter für empirische Modelle hergeleitet werden, mit denen dann der CO_2 -Austausch für die fehlenden Zeitpunkte ermittelt wird (Grünwald, 2003). Eine Methode, die das Auffüllen von Datenlücken mit einer indirekten Korrektur der Advektion von CO_2 verknüpft, ist die bei CARBODATA angewandte u^* -Korrektur. Bei dieser werden unterhalb einer bestimmten Schubspannungsgeschwindigkeit u^* (die ein Maß für die atmosphärische Turbulenz ist) modellierte Flüsse anstelle von gemessenen verwendet. Der Grenzwert ist unterschiedlich für jeden Standort. Bei Grünwald ist für Tharandt ein Wert von $0,3 \text{ ms}^{-1}$ angegeben. Die Korrektur wird für jedes Messintervall angewandt, in dem u^* kleiner als der definierte Grenzwert ist. Für die Vergleiche zwischen Stations- und Modelldaten wurden Tageswerte verwendet. Auch die Jahreswerte der Stationen wurden aus Konsistenzgründen aus den Tageswerten berechnet. Dadurch können sich kleinere Abweichungen zu den im CARBODATA-Datensatz angegebenen Jahreswerten der NEP ergeben. In dem Fall, dass die NEP-Tageswerte vollständig (also zu 100%) auf der u^* -Korrektur beruhen, ergibt sich ein unrealistisches Verhalten der Zeitreihen: Sind an mehreren Tagen hintereinander die Tageswerte der NEP auf diese Weise ermittelt, so ist zu beobachten, dass über diesen Zeitraum die NEP konstant auf dem gleichen Wert bleibt. Daher wurde eine Fallunterscheidung in der Auswertung vorgenommen: Zum einen wurden die Jahreswerte aus den vollständigen Zeitreihen der Tageswerte, einschließlich der zu 100% ergänzten Werte, gebildet. Zusätzlich wurden Pseudo-Jahressummen gebildet, aus denen die zu 100% auf gefüllten Werten basierenden Daten ausgeschlossen wurden. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die um die vollständig gefüllten Tage reduzierten Zeitreihen kurz als „reduzierte Zeitreihe“ bezeichnet, die Jahreswerte aus den reduzierten Zeitreihen als „Pseudo-Jahressummen“.

Zum Antrieb des Modells und zum Vergleich der Stationsdaten mit den Ergebnissen von BETHY und dem Antriebsdatensatz aus den ECMWF-Daten sollten Tageswerte Verwendung finden. Da die Einschwingzeit für das Bodenmodell ein Jahr beträgt, sollten die zu verwendenden Stationen zumindest zwei Jahre durchgehende Tageswerte ohne fehlende Daten liefern, und zwar sowohl in den Zeitreihen der meteorologischen Antriebswerte als auch in den turbulenten Flussdichten. Damit soll sichergestellt werden, dass für jeden Standort zumindest ein Jahreswert der NEP verglichen werden kann.

Auch dies schränkt die Anzahl der verwendbaren Stationen weiter ein. Folgende Stationen wurden verwendet: Tharandt, Loobos, Hyytiala, Vielsalm und Aberfeldy. Die Station Tharandt liegt westlich von Dresden im Tharandter Wald, Loobos befindet in den Niederlanden nordöstlich von Utrecht, Vielsalm ist in Belgien südlich von Aachen (D) gelegen. Hyytiala befindet in Finnland, 50 km nordöstlich der Stadt Tampere, Aberfeldy in Schottland. Für letztere Station ist auf der CARBOEUROPE-Webseite der Name Griffin angegeben, sie liegt ca. 140 km nordöstlich von Edinburgh. Die wichtigsten Eigenschaften der Standorte sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Station (Abkürzung)	Koordinaten	Elevation	Vegetationstyp	LAI	Bestandshöhe	Bodentyp	Zeitraum
Tharandt (TH)	50,97 N, 13,57 O	380 m	Picea Abies	7,6	26,5 m	Braunerde (Rhyolit)	1997 bis 2000
Loobos (LO)	52,17 N, 5,74 O	25 m	Pinus sylvestris	3	14 m	Sanddünen	1998 bis 2000
Hyytiala (HY)	61,85 N, 24,28 O	170 m	Pinus sylvestris	3	11 m	Haplischer Podzol	1998 bis 2000
Vielsalm (VI)	50,30 N, 6,00 O	450 m	Fagus sylvatica, Pseudotsuga menziesii	4,5	27 - 35 m	Dystrischer Cambisol	1998
Aberfeldy (AB)	56,62 N, 3,80 W	340 m	Picea sitchensis	8	8 m	Humic gley	1998

Tabelle 5.1: Die wichtigsten Eigenschaften der Standorte. Als Zeitraum sind die Jahre angegeben, für die die Simulationen ausgewertet wurden (ohne SpinUp).

5.2 Kontrolllauf mit Stationsdaten

Als Referenz für die weiteren Simulationen wurde zunächst ein Kontrolllauf durchgeführt. Als meteorologischer Antrieb dienten die Stationsdaten. Für den Kontrolllauf wurde weiterhin der in den Stationsbeschreibungen angegebene Blattflächenindex verwendet. Für diesen wurde die Annahme gemacht, dass er über den Zeitraum der Simulation als konstant angesehen werden kann, da sich die meisten Standorte in Nadelwäldern oder in Mischwäldern mit Nadelbäumen als dominanter Spezies befinden. Die atmosphärische CO₂-Konzentration am Standort der Stationen wurde nicht als zusätzliche Antriebsvariable verwendet, da diese nicht bei allen Stationen als kontinuierliche Zeitreihe vorhanden ist und die Simulationsergebnisse untereinander vergleichbar sein sollen.

Abbildung 5.1 zeigt den Vergleich der modellierten Jahreswerte der NEP mit

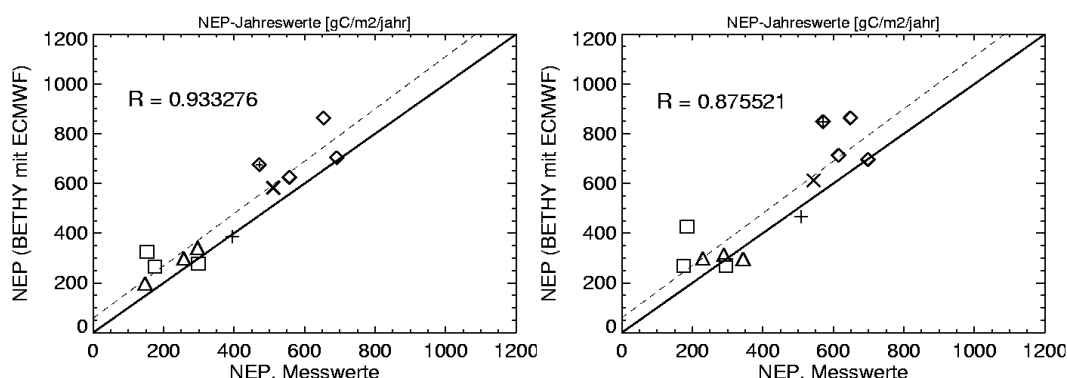


Abbildung 5.1: KONTROLLLAUF. Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für die verwendeten CARBOEUROPE-Stationen. Links abgebildet sind die Pseudo-Jahreswerte aus den reduzierten Zeitreihen, rechts die Jahreswerte aus den vollständigen Zeitreihen. \diamond : Tharandt, \triangle : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

den Messwerten. Zu erkennen ist eine systematische Überschätzung der NEP in fast allen Fällen. Die höchsten Werte ergeben sich bei Tharandt, die niedrigsten an den Standorten Hyytiala und Loobos. Letztere liegen in eher lichten Kiefernbeständen mit Werten des Blattflächenindex von 3. Dagegen liegt Tharandt in einem dichten Fichtenwald mit einem hohen Blattflächenindex von 7,6. Einzig Vielsalm und Hyytiala (für das Jahr 1998) weisen eine leichte Unterschätzung der modellierten NEP auf. Die Korrelation der Jahreswerte liegt bei $R = 0,93$ für die Pseudo-Jahressummen. Für die vollständigen Jahressummen liegt sie wie zu erwarten niedriger mit $R = 0,88$. Die Jahreswerte der NEP sind in Tabelle A.1 im Anhang zusammengefasst. Betrachtet man in Abbildung 5.2 die geglätteten Zeitreihen der modellierten und der gemessenen NEP, so fällt auf, dass die Überschätzung der NEP hauptsächlich im Sommer auftritt, wobei der qualitative Verlauf der Zeitreihen gut übereinstimmt. Die größten Abweichungen während der Sommermonate treten an den Stationen Tharandt und Hyytiala auf. Im Winter zeigt das Modell dagegen eine Tendenz zur Unterschätzung der NEP. Die mittlere relative Abweichung der modellierten Pseudo-Jahreswerte von den Messwerten beträgt $+20,4\%$.

Die Überschätzung der NEP kann zu einem Teil durch die Überschätzung der NPP (die ja linear in die NEP eingeht, siehe Gl. 1.2) durch die Parametrisierung der Tagesgänge erklärt werden (Kapitel 4.7). Diese beträgt knapp 10% für die Jahressummen der NPP im Vergleich zur direkten Dateneingabe (Abb. 4.11). Die Differenzen der Tageswerte betragen zwischen $0,6$ und $0,8$ $\text{gC/m}^2/\text{Jahr}$ im gleitenden Mittel. Allerdings ist in der NPP die heterotrophe

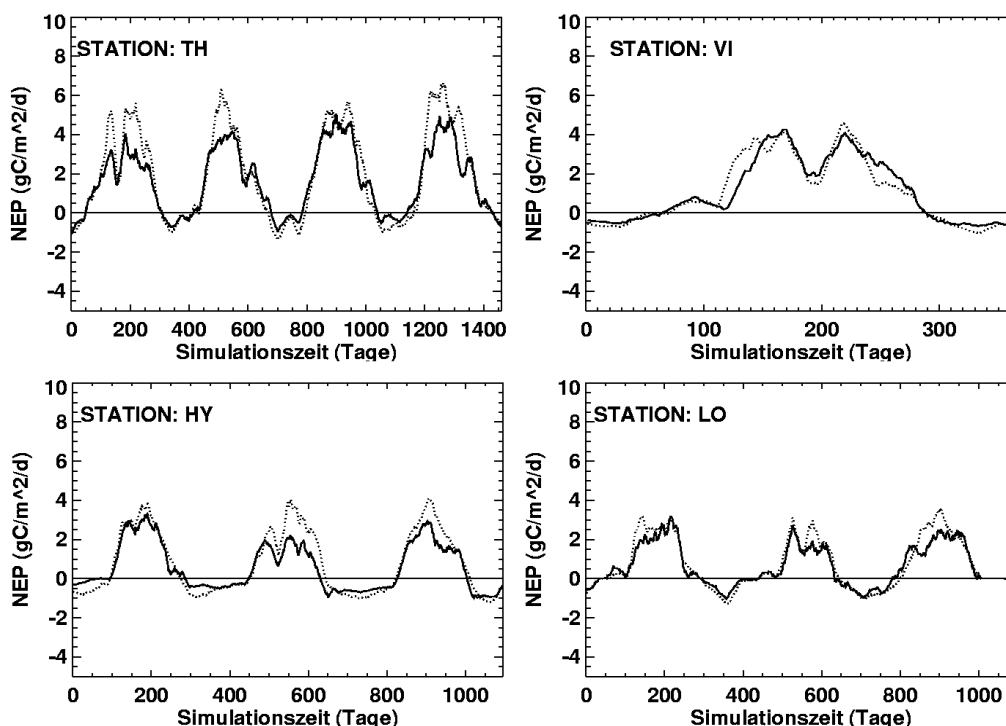


Abbildung 5.2: KONTROLLLAUF. Zeitreihen der gemessenen (durchgezogen) und modellierten (gestrichelt) NEP als gleitendes Mittel über 30 Tage für die Stationen Tharandt (TH), Vielsalm (VI), Hyytiala (HY) und Loobos (LO).

Respiration nicht berücksichtigt, so dass dieser Vergleich nur ein Anhaltspunkt sein kann. Ein weiterer Faktor ist die Randbedingung der konstanten atmosphärischen CO_2 -Konzentration (Kapitel 4.5). Diese ist im Modell mit 360 ppm fest vorgegeben. Betrachtet man die Zeitreihen der Stationswerte, so fällt auf, dass an allen Stationen die CO_2 -Konzentration höher ist, als der vorgegebene Wert. Abbildung 5.3 zeigt dies am Beispiel der Ankerstation Tharandt. Die mittlere relative Abweichung der CO_2 -Konzentration beträgt hier (einschließlich der Einschwingphase des Modells) 5,1%. Die relative Abweichung der NEP bei einer 10% höheren CO_2 -Konzentration beträgt 8,2%. Mit der Annahme einer linearen Abhängigkeit zwischen relativer Überschätzung der CO_2 -Konzentration und der relativen Abweichung der NEP ergibt sich daraus eine theoretische Überschätzung der NEP von 4,1% unter alleiniger Berücksichtigung dieser Randbedingung.

Eine weitere Fehlerquelle, die zur systematischen Überschätzung der NEP beitragen kann, ist die Annahme eines konstanten LAI im Jahresverlauf. Auch bei Nadelwäldern ist ein Jahresgang des LAI vorhanden. Daher kann

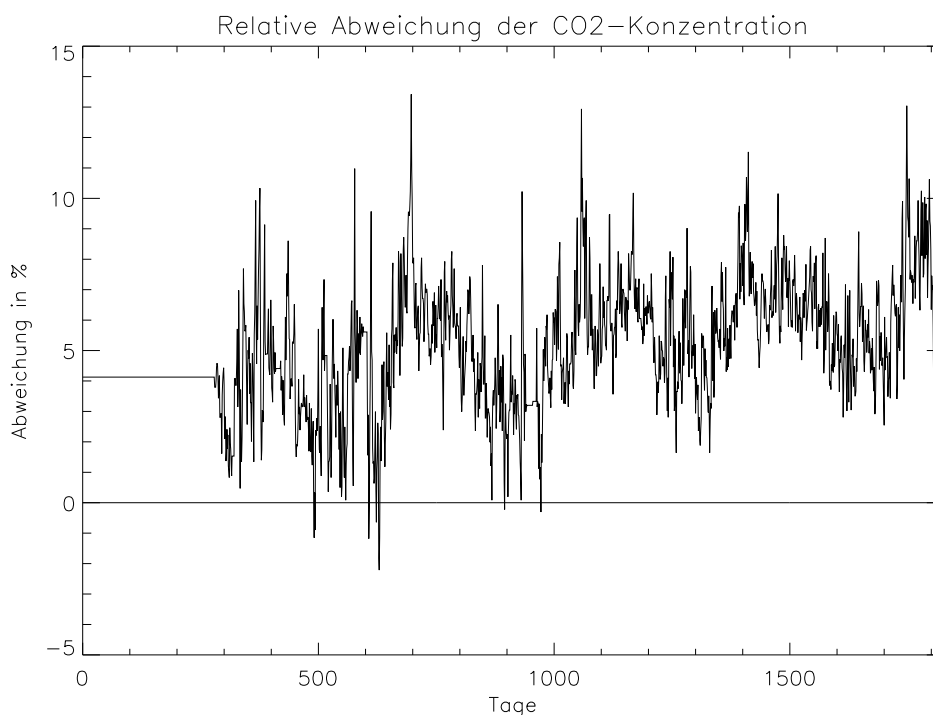


Abbildung 5.3: Relative Abweichung zwischen gemessener CO_2 -Konzentration und dem Randwert von 360 ppm am Beispiel der Ankerstation Tharandt für die Jahre 1996 bis 2000.

sich gerade in Frühjahr und Herbst diese Annahme negativ auf die Simulationsergebnisse auswirken.

5.3 Simulation mit Flächeninput

Mit BETHY soll künftig die flächenhafte Verteilung von CO_2 -Quellen und -Senken simuliert werden. Da die in Kapitel 3 vorgestellten Datensätze als Antrieb dienen sollen, muss geprüft werden, wie stark die Antriebsdaten von den realen Verhältnissen vor Ort abweichen und wie sich dies auf die Simulationsergebnisse auswirkt. In diesem Kapitel soll überprüft werden, wie sich das Modell verhält, wenn die PAR mit der in Kapitel 3 vorgestellten Methode aus den Bewölkungsanalysen des ECMWF berechnet wird. Der LAI erhält mit den Datensätzen der Universität Boston nun eine eigene Dynamik. Die Ergebnisse der Jahreswerte dieser Simulation sind in Abbildung 5.4 und in Tabelle A.2 (Anhang) dargestellt. Die Korrelation zwischen Stationswerten und Simulationen ist hier sehr schlecht. Für die meisten Stationen wird

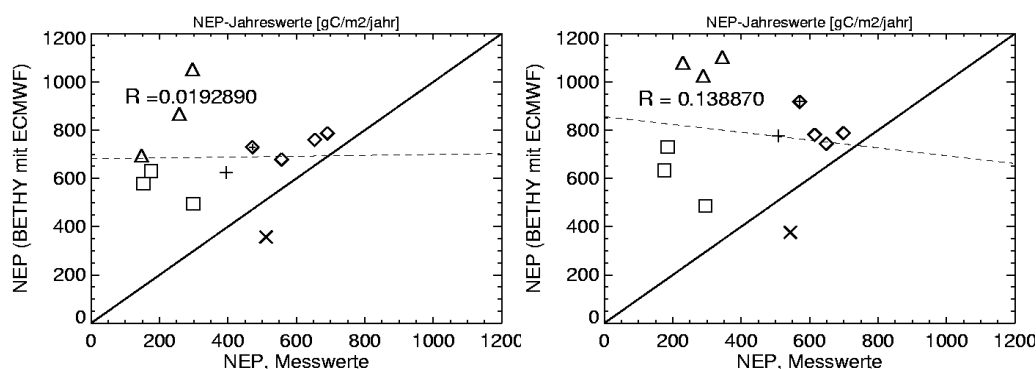


Abbildung 5.4: FLÄCHENINPUT: Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für den Test mit Flächendaten als Antrieb. Links abgebildet sind die Pseudo-Jahreswerte aus den reduzierten Zeitreihen, rechts die Jahreswerte aus den vollständigen Zeitreihen. \diamond : Tharandt, \triangle : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

die NEP zum Teil massiv überschätzt. Auch ist keine Systematik der Abweichungen der Jahreswerte zu erkennen. Nur für Aberfeldy ergibt sich eine Unterschätzung der NEP. Alleine die Werte für Tharandt sind in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Kontrolllauf. Die Streudiagramme der Tageswerte (Abb. 5.6) weisen Korrelationen zwischen 0,58 (Aberfeldy) und 0,74 (Hyytiala) auf und zeigen ebenfalls eine deutliche Tendenz zur Überschätzung der NEP. Die geglätteten Zeitreihen der NEP für Stationen und Simulationsergebnisse offenbaren eine Überschätzung der NEP vor allem während der Sommermonate. Der zeitliche Verlauf wird dabei qualitativ gut wiedergegeben (Abbildung 5.5). Positive Abweichungen treten wie beim direkten Vergleich vor allem im Sommer auf.

Im Gegensatz zum Kontrolllauf sind die Abweichungen bei diesem Test nicht systematisch, weiterhin sind die Abweichungen dort geringer. Die Vermutung liegt nahe, dass zumindest einer der Antriebsdatensätze für die Überschätzung verantwortlich ist. Wahrscheinlicher ist jedoch eine Kombination aus mehreren Ursachen. Dafür spricht, dass die Überschätzung der Jahreswerte nicht bei allen Stationen solche hohen Werte aufweist. Die zu beantwortende Frage lautet daher: Wie gut stimmen die Eingangsdatensätze mit den realen Bedingungen vor Ort überein? Daher werden zunächst die Antriebsdaten mit den Stationswerten verglichen.

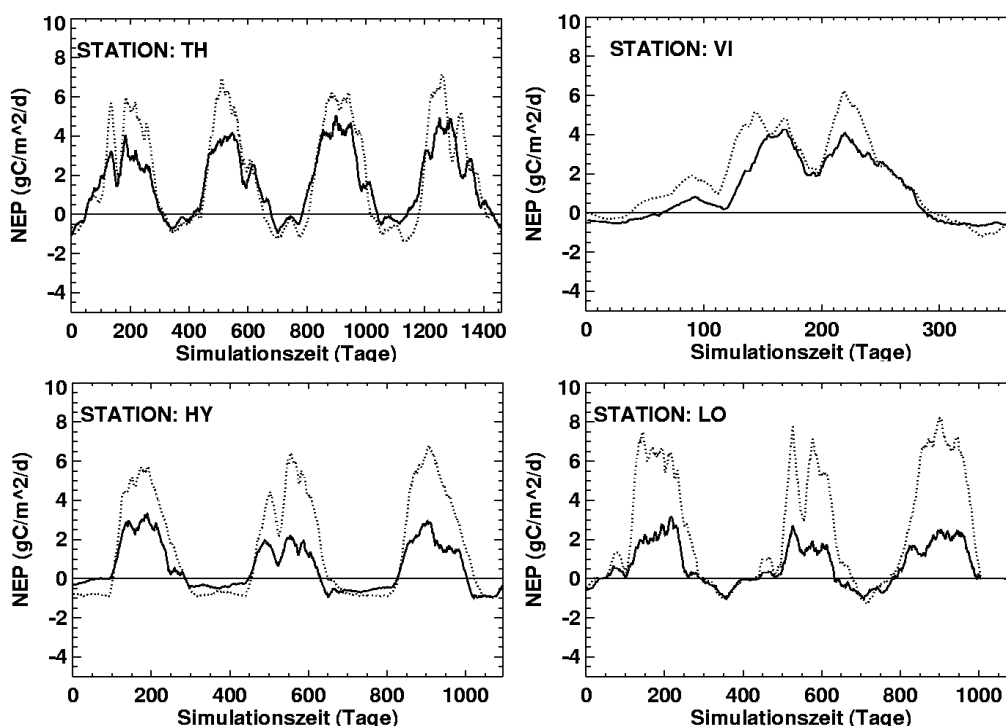


Abbildung 5.5: FLÄCHENINPUT: Zeitreihen der gemessenen (durchgezogen) und simulierten (gestrichelt) NEP ($\text{gC/m}^2/\text{Tag}$) als gleitendes Mittel über dreißig Tage für die Simulationen mit Flächeninput.

5.3.1 Analyse des Modellinputs

Zunächst werden die Tagessummen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) betrachtet. Diese ist zusammen mit der Temperatur und der Phänologie der wichtigste Antriebsparameter bei der Berechnung der Photosynthese. Abbildung 5.9 zeigt Streudiagramme der PAR-Tagessummen. Diese zeigen insgesamt eine gute Korrelation mit den Stationsdaten. Diese liegt zwischen 0,86 für Aberfeldy (nicht abgebildet) und 0,95 für Hyytiala. Ein Trend zu Überschätzung ist bei allen Stationen erkennbar. Deutlicher sichtbar wird dies, wenn die Differenzen zwischen Stationswerten und Modellinput als Zeitreihe dargestellt werden (Abbildung 5.8). Hier zeigt sich, dass die PAR vor allem im Sommer deutlich überschätzt wird. Die Saisonalität ist bei allen Stationen sehr deutlich zu erkennen. Die positive Abweichung der PAR in den geglätteten Zeitreihen beträgt maximal ca. $3 \text{ MJ/m}^2/\text{Tag}$. Offensichtlich überschätzt der verwendete Ansatz für die PAR diese systematisch. Abbildung 5.10 zeigt die Jahreswerte der verwendeten Antriebsdatensätze gegen die Jahreswerte der Stationen. Von der Regression ausgenommen ist der Wert

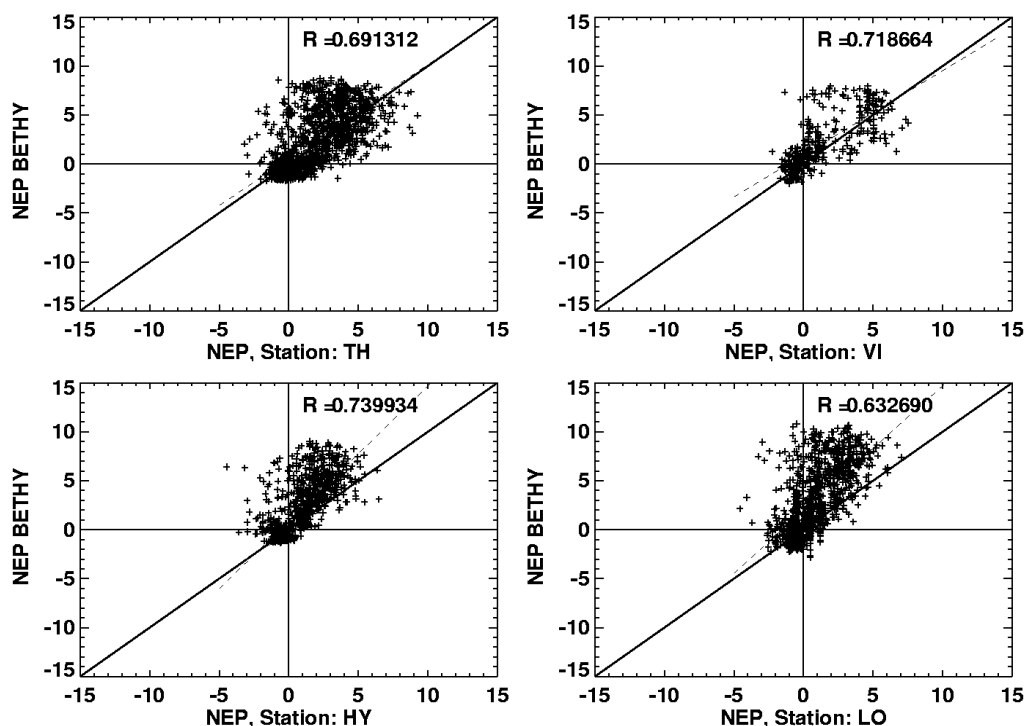


Abbildung 5.6: FLÄCHENINPUT: Streudiagramme der simulierten NEP gegen die Messwerte der NEP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Tag}$) für die Simulation mit Flächendaten als Antrieb. Abgebildet sind nur die Tageswerte, bei denen nicht für 100 % der vorhandenen Werte der Füllalgorithmus verwendet wurde.

der Station Vielsalm, da der Jahreswert deutlich außerhalb des Wertebereiches der anderen Stationen liegt. Die Korrelation ist mit $R = 0,99$ sehr hoch. Es fällt aber eine systematische Überschätzung der PAR bei allen Stationen auf. Ursache hierfür kann eine Fehleinschätzung der Bewölkung (vor allem der räumlich sehr variablen konvektiven Bewölkung) während der Sommermonate durch die ECMWF-Analysen sein. Weiterhin ist die Berechnung der Transmissionskoeffizienten in Gl. 3.1 unsicher, da hier außer der Bewölkung keine weiteren Einflussfaktoren wie der Aerosolgehalt und der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre enthalten sind.

Zur Untersuchung der Temperatur wurden die Tagesmittelwerte herangezogen. Die Streudiagramme aus Messwerten und den aus den ECMWF-Analysen berechneten Werten (Abb. 5.13) zeigen eine sehr gute Korrelation mit Werten des Korrelationskoeffizienten zwischen 0,99 (Hyytiala) und 0,93 (Loobos). Bei den Abweichungen von den Stationswerten gibt es sowohl systematische Unterschätzungen (Aberfeldy) wie auch Überschätzungen (Vielsalm) der Tageswerte (Abbildung 5.12). Jedoch zeigen die Zeitreihen der Dif-

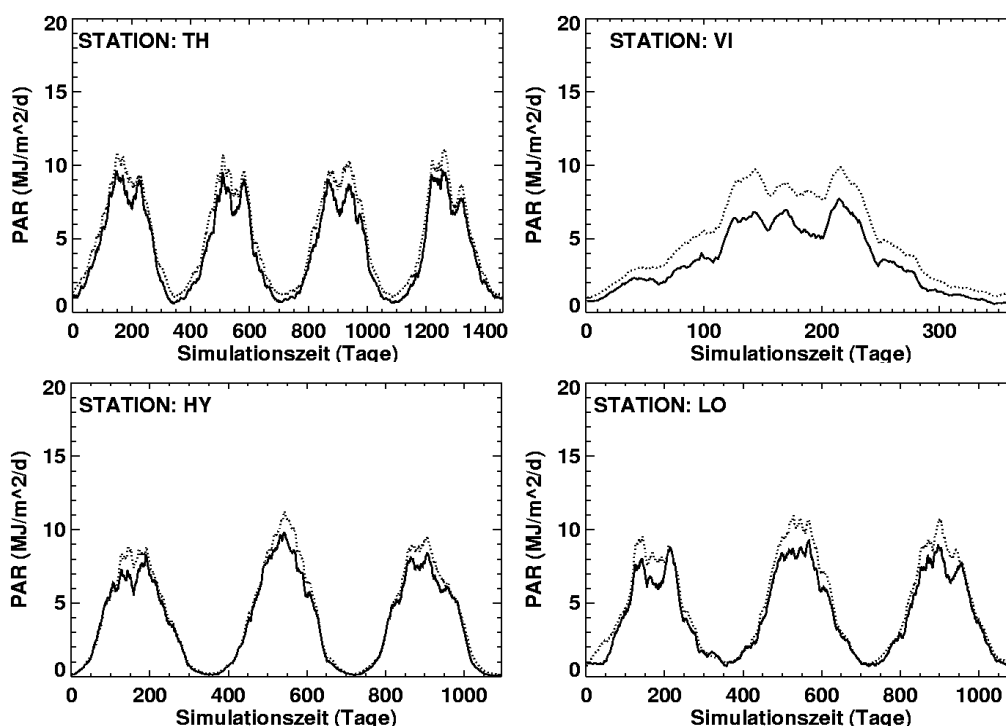


Abbildung 5.7: FLÄCHENINPUT: Vergleich der gemessenen und simulierten Tageswerte der PAR als gleitendes Mittel über dreißig Tage. Durchgezogen sind die Messungen, gestrichelt die Simulationswerte

ferenzen keine Saisonalität. Die Bedingungen, die diese Abweichungen hervorrufen, müssen also im Jahresverlauf konstant bleiben. Es ist zu vermuten, dass die stark variierenden regionalen Standortbedingungen der Stationen für die Systematik verantwortlich sind. Diese können aufgrund der Auflösung des ECMWF-Modells nicht ausreichend berücksichtigt werden. Da die Temperaturen mit der Elevation skaliert werden, ergibt sich weiterhin die Vermutung, dass vielleicht dieses Vorgehen selbst für einen Teil der Abweichungen verantwortlich ist. Dies wäre z.B. der Fall, wenn fälschlicherweise eine Differenz in der Elevation angenommen wird, obwohl in Wirklichkeit keine vorhanden ist, oder wenn sie über- oder unterschätzt wird. Da sowohl die verwendete ETOP-Elevation als auch die ECMWF-Elevation Flächenmittel sind, (die Auflösung der ETOP beträgt 5 km, die des ECMWF ca. 50 km oder 0,5°), ist diese Möglichkeit in Betracht zu ziehen. Aber auch im Fall der größten Differenz zwischen der ETOP- und der ECMWF-Elevation (-190 m) ergibt dies nur eine Skalierung um -1,25°C während die Werte im Mittel um ca. 3°C nach unten abweichen. Der größte Teil der Abweichung kann in diesem Fall also nicht durch die Skalierung mit der Elevation bedingt sein. Im Falle

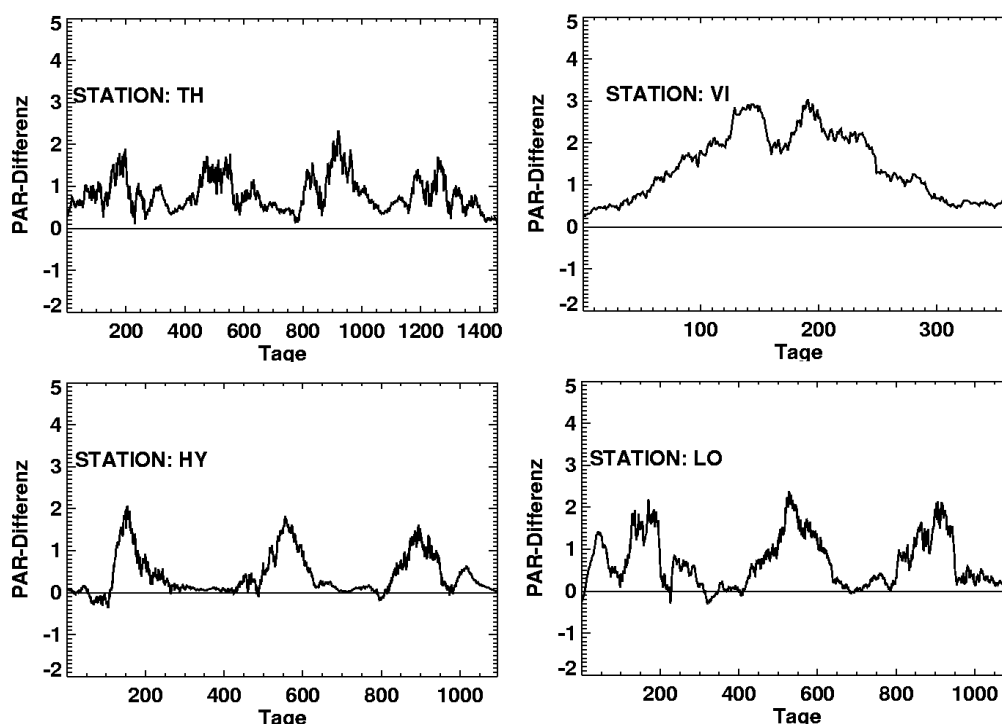


Abbildung 5.8: Vergleich der Differenz der gemessenen und simulierten Tageswerte der PAR ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{Tag}$) als gleitendes Mittel über 30 Tage. Durchgezogen sind die Messungen, gestrichelt die Simulationswerte

der Station Vielsalm mit einer Differenz von +65 m in der Elevation, bewirkt dies eine positive Abweichung von $+0,42^\circ\text{C}$ bei einer mittleren positiven Abweichung um 2°C . Auch hier kann die Skalierung mit der Elevation also nur zu einem geringen Anteil zu den systematischen Abweichungen beitragen.

Der Niederschlag wird als Tagessumme zum Antrieb des Modells verwendet. Eine Betrachtung der geglätteten Zeitreihen zeigt, dass Niederschlag systematisch unterschätzt wird (Abbildung 5.14 und 5.15). Der Sensitivitätstest in Kapitel 4.3 zeigt, dass mit zu geringer Niederschlagsmenge eine Tendenz zu einer leicht erhöhten NEP vorhanden ist. Für eine um 20% zu geringe Niederschlagsmenge wurden dort um ca. 3 bis 5% höhere Werte der NEP gefunden. Die teilweise massiven Überschätzungen der NEP können damit alleine also nicht erklärt werden. Die schlechte Wiedergabe der NEP-Jahreswerte muss daher noch andere Ursachen haben.

Wichtigste Größe zur Beschreibung der Phänologie ist der Blattflächenindex (LAI). Dieser wirkt sich sowohl auf den Energiehaushalt (Strahlungsbilanz und latenter Wärmefluss) als auch auf den CO_2 Austausch (Vegetationsdichte) aus. Ein zu niedriger LAI bewirkt eine zu geringe Photosyntheserate des

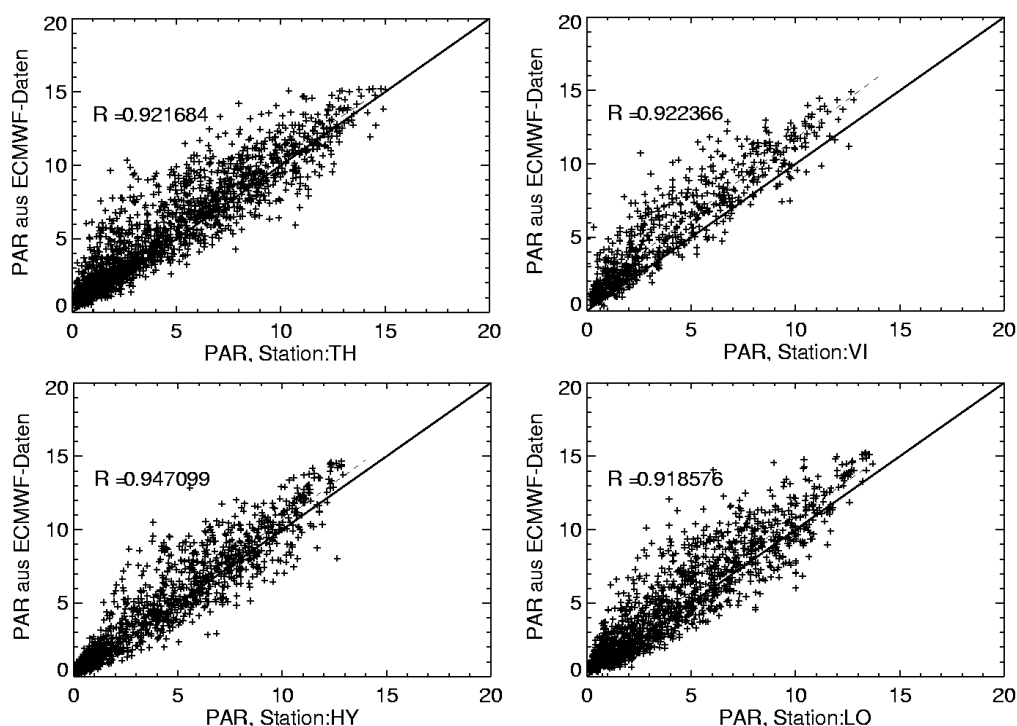


Abbildung 5.9: Streudiagramm der aus ECMWF-Analysen der Bewölkung berechneten Tageswerte der PAR ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{Tag}$) gegen die Meßwerte.

Station	LAI_{max} Station	LAI_{max} ZR
Tharandt (TH)	7,6	6
Loobos (LO)	3	6
Hyytiala (HY)	3	6
Vielsalm (VI)	4,5	6
Aberfeldy (AB)	8	6

Tabelle 5.2: Vergleich der Maximalwerte des LAI für die Stationsstandorte und die Zeitreihen aus den Satellitendaten.

Bestandes, ein zu hoher LAI eine zu hohe Photosyntheserate. Dabei geht die Photosynthese mit zunehmendem LAI in Sättigung, so dass sich Änderungen im oberen Wertebereich weniger stark auswirken sollten als im unteren. Ein Vergleich des maximalen LAI der verwendeten Zeitreihen für die Standorte der Stationen und der in den Stationsbeschreibungen angegebenen Werte ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Für drei Standorte (Vielsalm, Loobos und Hyytiala) werden die Maximalwerte überschätzt, für zwei Standorte unterschätzt (Aberfeldy und Tharandt). Für Hyytiala und Loobos ist der Sta-

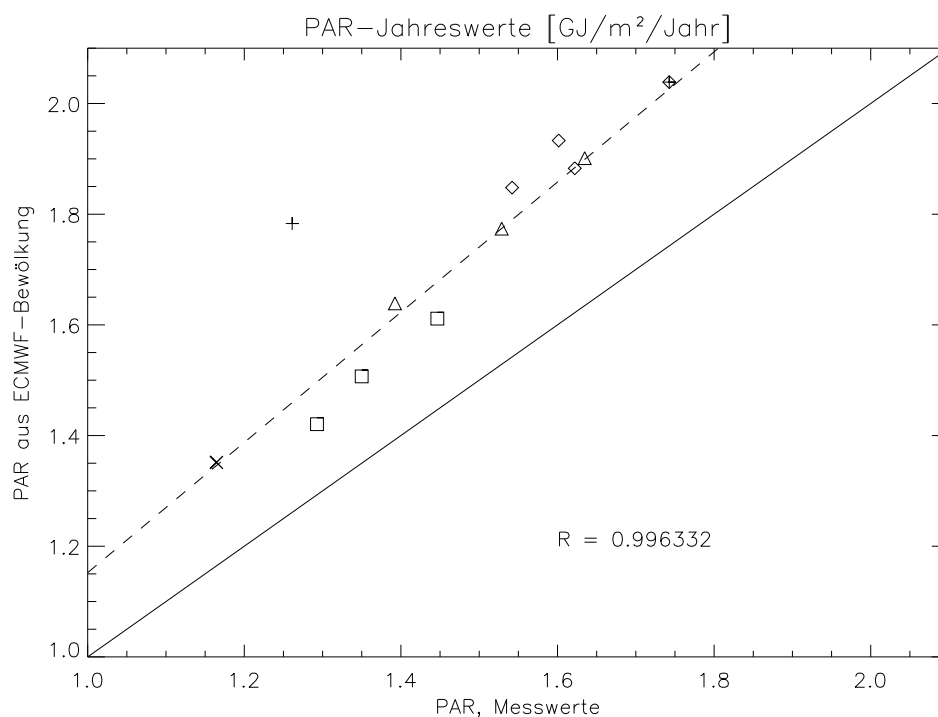


Abbildung 5.10: Streudiagramm der aus den Bewölkungsanalysen des ECMWF gewonnenen PAR gegen die Jahreswerte. Von der Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurde die Station Vielsalm ausgenommen, da ihr Wert deutlich außerhalb der anderen Stationswerte liegt. ◇: Tharandt, △: Loobos, □: Hyytiala, ×: Aberfeldy.

tionswert nur halb so groß, wie der aus den Satellitendaten abgeleitete. Eine Ursache hierfür kann die mit 16 km schon recht niedrige Auflösung der Werte sein, die kleinskalige Unterschiede im Bewuchs nicht mehr berücksichtigt. Beim Sensitivitätstest für den Blattflächenindex ergab sich eine Abweichung der NEP von rund $\pm 10\%$ für eine Unsicherheit im LAI von $\pm 20\%$. Der Referenzwert für den LAI war 4,5 für Vielsalm. Die hohen Abweichungen für die Standorte Loobos und Hyytiala können also durchaus mit der Überschätzung des LAI für diese Gitterpunkte zusammenhängen. Für Tharandt ergibt sich dagegen eine leichte Unterschätzung des LAI. Diese sollte sich jedoch nicht gravierend auf die Modellergebnisse auswirken, da im Wertebereich des LAI zwischen 6 und 7,6 die Photosynthese schon in Sättigung sein sollte. Ein weiterer wichtiger Eingangsparameter ist die Verteilung der Vegetation im Simulationsgebiet. In diesem Fall wird aus der Klassifikation der Landnutzung nach PELCOM auf die Verteilung der Vegetationstypen und -parameter geschlossen (Kapitel 3.1). Weiterhin ist eine exakte Georeferenzierung (Zu-

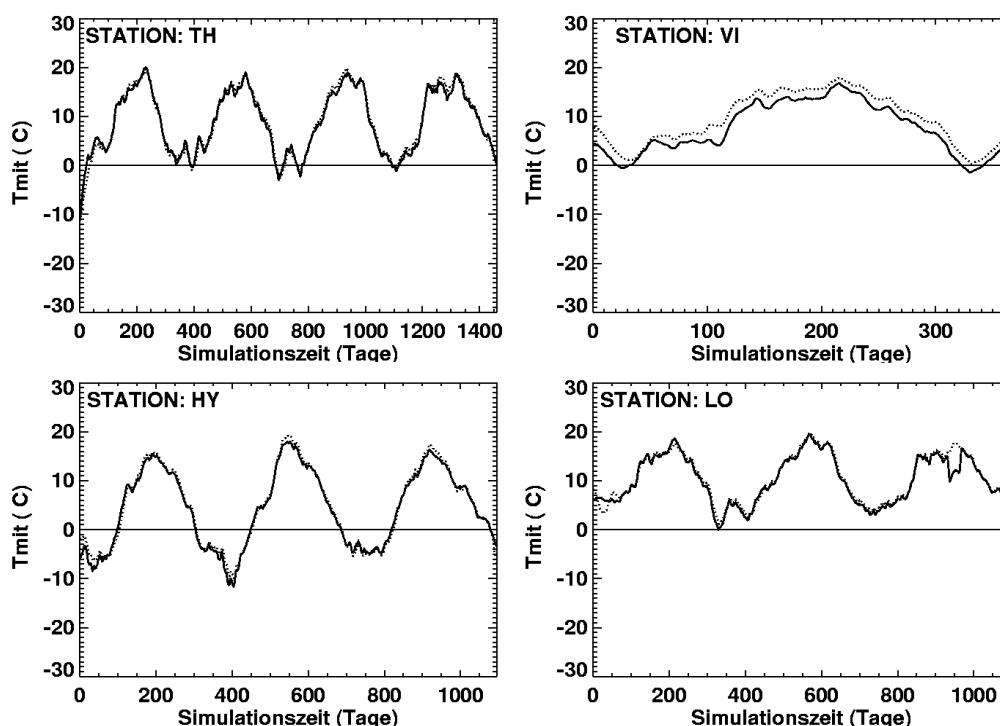


Abbildung 5.11: Zeitreihen der gemessenen und aus ECMWF-Analysen berechneten Tagesmitteltemperatur ($^{\circ}\text{C}$) als gleitendes Mittel über dreißig Tage.

weisung der genauen Koordinaten für jedes Pixel) der Landnutzungsklassen notwendig. Dieser Faktor ist nicht zu unterschätzen, da die Genauigkeit dieser Zuordnung einige Pixel betragen kann. Tabelle 5.3 zeigt einen Vergleich zwischen der PELCOM-Landklassifikation und den Vegetationstypen, die an den Standorten der Stationen vorkommen. Zu erkennen ist, dass an drei Standorten (Loobos, Vielsalm und Aberfeldy) die PELCOM-Klassifikation andere Klassen liefert als die Standortbeschreibungen. Dies kann zum einen auf Ungenauigkeiten in der Georeferenzierung zurückzuführen sein, zum anderen machen sich hier die Schwierigkeiten der PELCOM-Klassifikation mit gegliedertem Gelände bemerkbar (Kapitel 3.1). Weiterhin können durch die Auflösung von 1 km feinere Strukturen in der Landnutzung nicht mehr erkannt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die PAR systematisch überschätzt, der Niederschlag dagegen systematisch unterschätzt wird. Beides sollte eine Überschätzung der NEP zur Folge haben. Die hohen Abweichungen an den Stationen Hyytiala und Loobos können hiermit jedoch nicht erklärt wer-

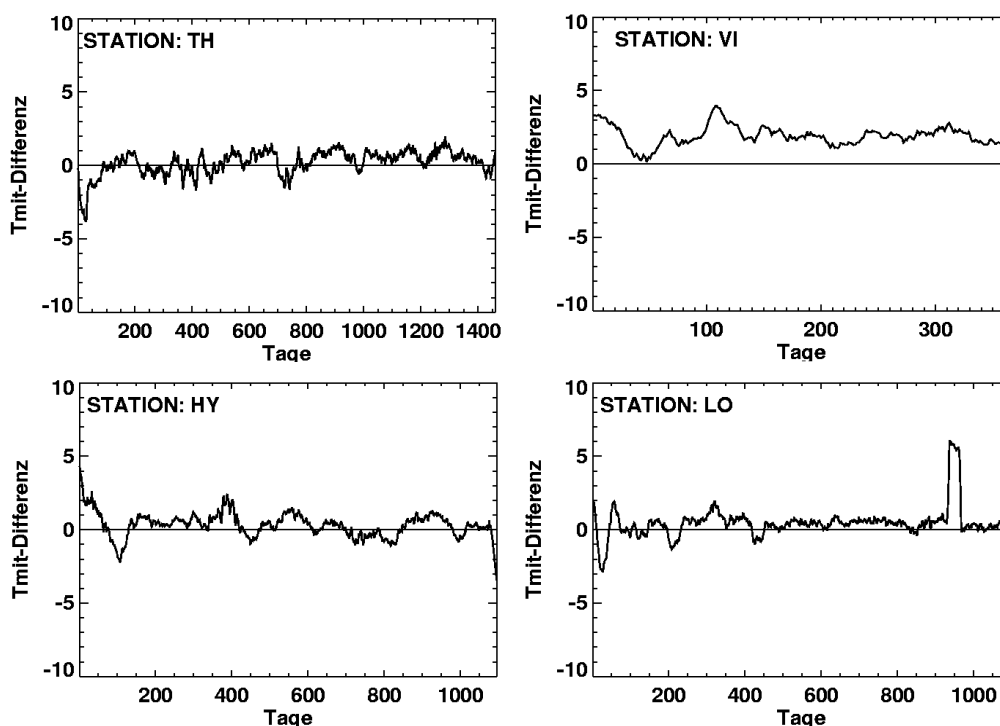


Abbildung 5.12: Differenz aus gemessener und aus ECMWF-Analysen berechneter Tagesmitteltemperatur ($^{\circ}\text{C}$) als gleitendes Mittel über dreißig Tage.

den, da die Abweichungen der Antriebsdaten von den Messwerten systematisch sind, die Unterschiede in der NEP jedoch auf den ersten Blick keine Systematik aufweisen. Die Temperatur wird für die einzelnen Stationen sowohl systematisch über- als auch unterschätzt. Dafür verantwortlich sind sehr wahrscheinlich die starken regionalen Unterschiede, die von den ECMWF-Daten mit $0,5^{\circ}$ Auflösung nicht erfasst werden können. Die Standorte mit den höchsten Abweichungen der modellierten NEP (Loobos, Hyytiälä, Vielsalm) weisen eine hohe Abweichung in den Eingangsdaten des LAI, sowie teilweise auch der Landnutzung auf. Daher sollen als nächstes die Auswirkungen dieser Eingangsdaten auf die Simulation untersucht werden.

5.3.2 Simulation mit LAI-Korrektur

Zuerst soll ermittelt werden, wie sich die Überschätzung des LAI auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Für die Stationen, an denen der LAI überschätzt wird, wurde der erlaubte Wertebereich nach oben durch den Stationswert begrenzt. Für Vielsalm gilt daher $\text{LAI}_{max} = 4,5$, für Hyytiälä und Loobos $\text{LAI}_{max} = 3$. Im Falle der Stationen Tharandt und Abberfeldy,

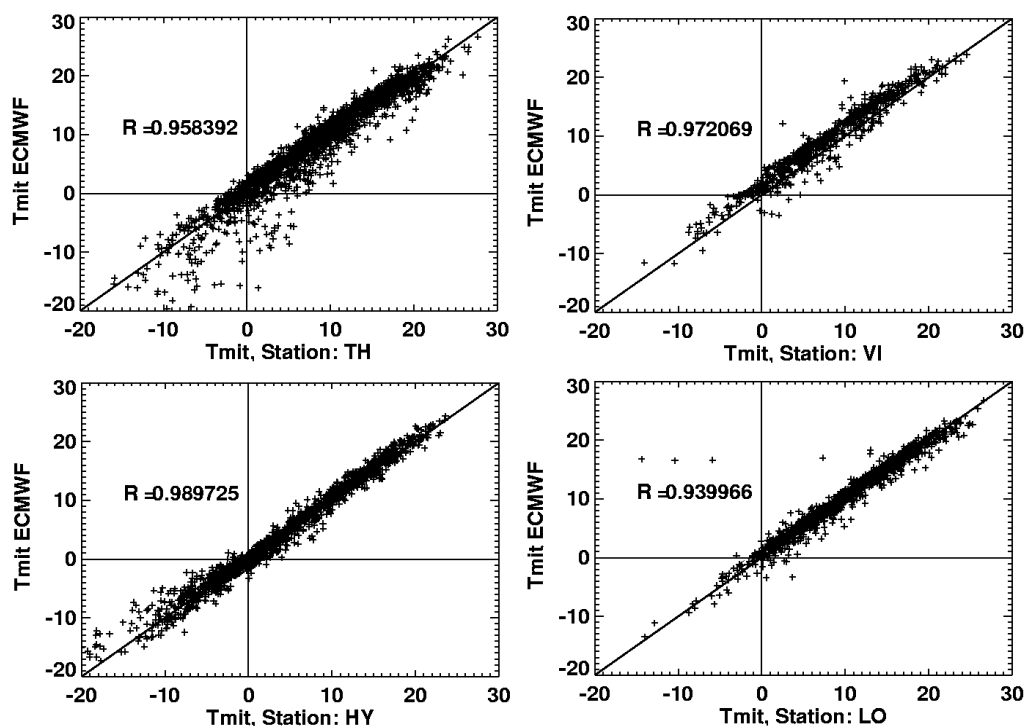


Abbildung 5.13: Streudiagramm der aus ECMWF-Analysen berechneten Tagesmitteltemperatur ($^{\circ}\text{C}$) gegen die Stationswerte.

bei denen der LAI durch die Eingangsdaten unterschätzt wird, wurde keine Veränderung vorgenommen. Hier wird angenommen, dass sich (im Wertebereich $\text{LAI}=[6,8]$) die Photosynthese bereits in Sättigung befindet und die Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse vernachlässigbar sind.

Abbildung 5.16 zeigt die Jahreswerte der NEP für diesen Test. Die Werte der Stationen Tharandt und Aberfeldy bleiben unverändert. Bei allen Simulationen, für die der LAI nach oben durch den Stationswert begrenzt wurde, ist die jährliche NEP deutlich reduziert. Die Korrelation der modellierten NEP und der Messwerte ist deutlich besser als im Falle ohne Korrektur. Im Falle von Hyytiala sind die Ergebnisse bereits wieder in der gleichen Größenordnung wie beim Kontrolllauf (Tabelle A.3, Anhang). Die Zeitreihe der Differenz aus Messwert und Modellergebnis (Abbildung 5.17) zeigt sowohl bei der Station Hyytiala als auch bei Loobos noch eine ausgeprägte Saisonalität. Für die Station Vielsalm und vor allem für Loobos sind die Jahreswerte nach wie vor zu hoch. Beides sind Stationen, deren Landnutzung falsch klassifiziert wurde. Daher liegt es nahe, zusätzlich eine Korrektur der zugrundeliegenden Landnutzung anzuwenden.

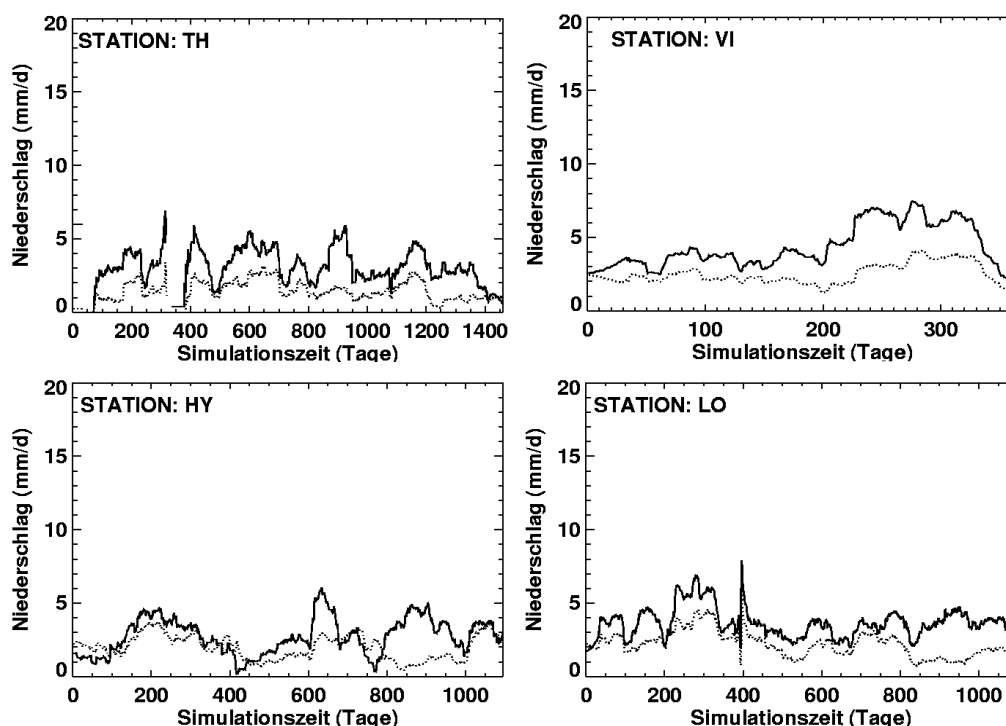


Abbildung 5.14: Gemessener (durchgezogen) Niederschlag (mm/d) und die Werte aus den ERA40-Reanalysen (gestrichelt) als gleitendes Mittel über dreißig Tage.

5.3.3 Korrektur der Landnutzung

Für diese Simulation wurde zusätzlich zur Begrenzung des LAI die Landnutzung der Stationen Loobos, Vielsalm und Aberfeldy korrigiert. Abbildung 5.18 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation. Für Vielsalm und Aberfeldy sind die Ergebnisse nur leicht verändert. Dagegen sind jetzt auch bei Loobos die Ergebnisse deutlich realistischer. Die Korrelation zwischen den Ergebnissen ist deutlich verbessert. Ursache hierfür ist, dass die Landnutzung für Loobos deutlich stärker von der Realität abweicht. In der PELCOM-Klassifikation ist für Loobos Grasland angegeben, an der Station ist jedoch Kiefernwald vorherrschend. Da C3-Kurzgräser eine im Vergleich höhere Produktivität besitzen als Nadelwälder (Knorr, 1997), wird hierdurch die Produktivität an diesem Standort überschätzt. Dagegen ist die Abweichung zwischen Mischwald und Nadelwald offensichtlich deutlich geringer. Die Streudiagramme der Tageswerte für Loobos und Hyytiala zeigen nach den Korrekturen eine deutlich verbesserte Korrelation und eine weit geringere Überschätzung der NEP. Auch die gleitenden 30-tägigen Mittelwerte zeigen eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulatio-

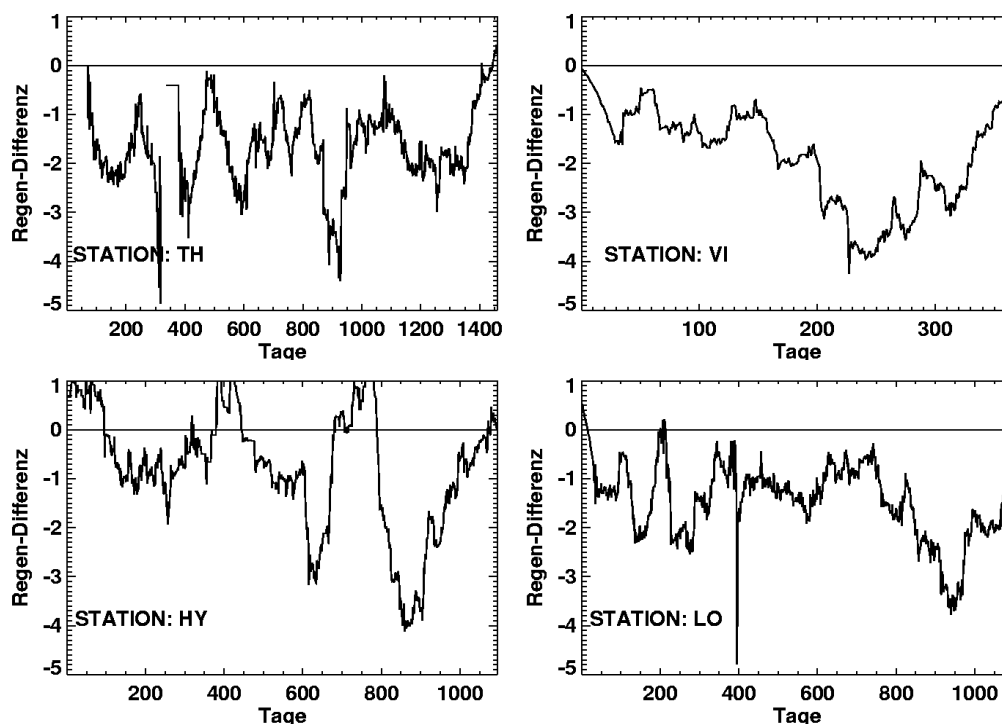


Abbildung 5.15: Differenz zwischen den Messwerten des Niederschlags (mm/d) und den Werten der ERA40-Reanalysen des ECMWF.

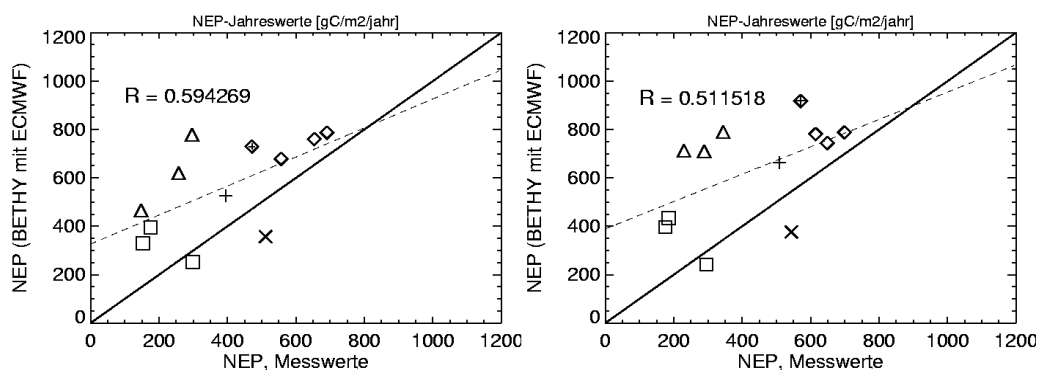


Abbildung 5.16: TEST, LAI: Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für den Test mit nach oben begrenztem LAI. Links: Pseudo-Jahreswerte der reduzierten Zeitreihen. Rechts: Jahreswerte der vollständigen Zeitreihen. \diamond : Tharandt, Δ : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

nen. Insgesamt fällt immer noch eine gegenüber dem Referenzlauf erhöhte NEP für alle Stationen auf. Es stellt sich nun die Frage, welche Eingabegröße eine systematische Überschätzung der simulierten NEP gegenüber dem

Station	V.Typ Station	LCC Station	LCC PELCOM
Tharandt (TH)	Picea Abies (Fichte)	Nadelwald	Nadelwald
Loobos (LO)	Pinus sylvestris (Kiefer)	Nadelwald	Grasland
Hyytiala (HY)	Pinus sylvestris (Kiefer)	Nadelwald	Nadelwald
Vielsalm (VI)	Fagus sylvatica (Rotbuche), Pseudotsuga menziesii (Douglastanne)	Mischwald	Nadelwald
Aberfeldy (AB)	Picea sitchensis (Fichte)	Nadelwald	Mischwald

Tabelle 5.3: Vergleich der Landnutzung nach PELCOM an den Standorten und den äquivalenten Landnutzungsklassen nach PELCOM, die aus den Beschreibungen der Vegetationstypen an den Standorten der Stationen hervorgehen.

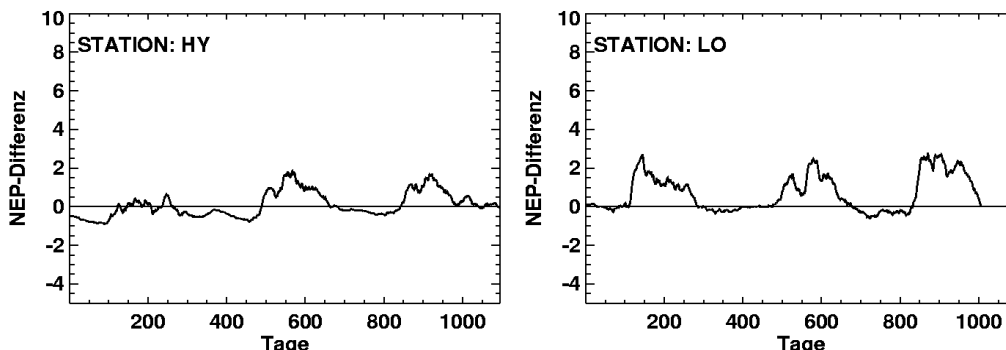


Abbildung 5.17: TEST, LAI: Zeitreihen der Differenz aus der gemessenen und modellierten NEP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Tag}$) als gleitendes Mittel über 30 Tage. Dargestellte Stationen sind Hyytiala (links) und Loobos (rechts).

Referenzlauf bewirken kann. Da dies bei allen Stationen auftritt, fallen Abweichungen in der Temperatur als Ursache aus, da hier sowohl Über- als auch Unterschätzungen vorkommen. Systematisch sind dagegen bei allen Stationen die Überschätzung der PAR und die Unterschätzung des Niederschlags. Die Sensitivitätsstudien aus Kapitel 4 zeigen, dass die Unterschätzung des Niederschlags nur eine geringfügig höhere NEP zur Folge hat. Daher ist an-

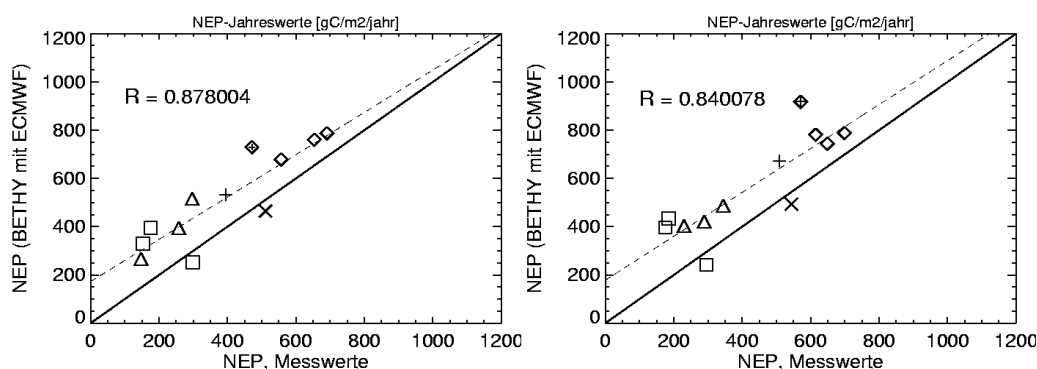


Abbildung 5.18: TEST, LAI+LCC: Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für den Test mit nach oben begrenztem LAI und korrigierter Landnutzung für die Stationen Loobos, Vielsalm und Abberfeldy. Links: Pseudo-Jahreswerte der reduzierten Zeitreihen. Rechts: Jahreswerte der vollständigen Zeitreihen. \diamond : Tharandt, \triangle : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Abberfeldy.

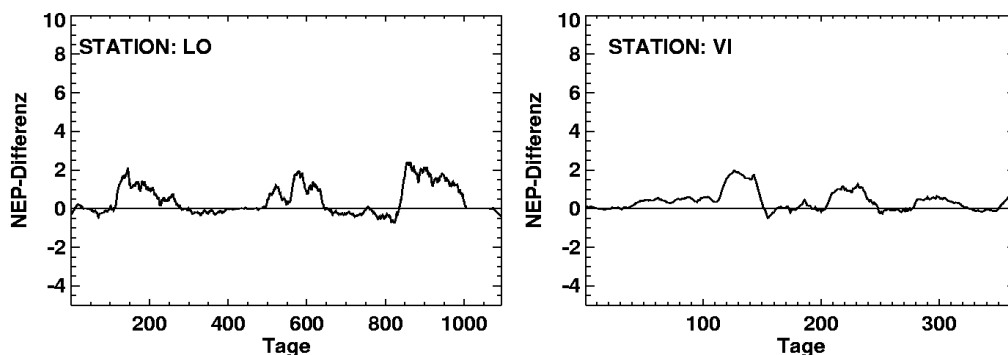


Abbildung 5.19: TEST, LAI+LCC: Zeitreihen der Differenz aus der gemessenen und modellierten NEP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Tag}$) für den Test mit nach oben begrenztem LAI und korrigierter Landnutzung als gleitendes Mittel über 30 Tage.

zunehmen, dass die Überschätzung der PAR für die Überschätzung der NEP im Vergleich zum Referenzlauf verantwortlich ist.

5.3.4 Korrektur der PAR

Als Hauptfehlerquelle für die schlechte Korrelation zwischen Stationsdaten und den Simulationen mit Flächendaten als Antrieb wurden Fehler in der Klassifikation der Landnutzung und in den Maximalwerten des LAI ausgemacht. Trotzdem zeigt z.B. die Zeitreihe der Differenzen zwischen Messwerten und Simulation (Abbildung 5.19) immer noch eine ausgeprägte Saisonalität. Im Vergleich zum Kontrolllauf werden die Werte der meisten Stationen wei-

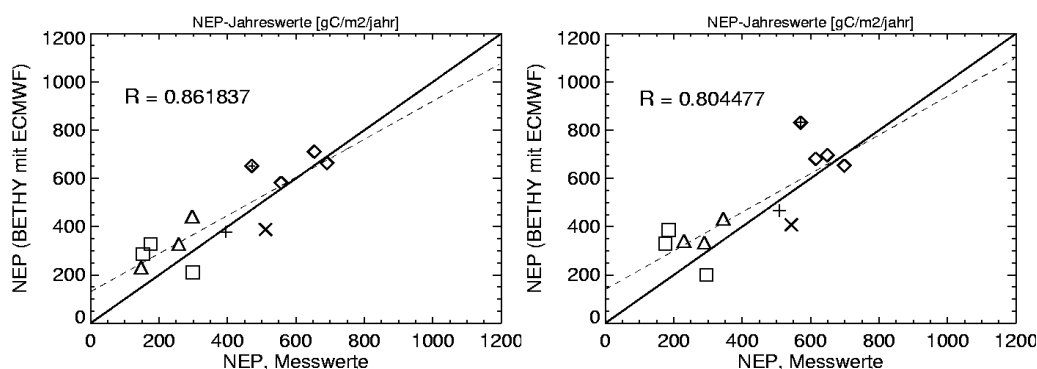


Abbildung 5.20: TEST, LAI+LCC+PAR: Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für den Test mit PAR-Zeitreihen aus Stationsdaten für die Stationen Loobos, Vielsalm und Aberfeldy. Links: Pseudo-Jahreswerte der reduzierten Zeitreihen. Rechts: Jahreswerte der vollständigen Zeitreihen. \diamond : Tharandt, \triangle : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

terhin überschätzt. Daher soll an dieser Stelle überprüft werden, wie stark sich die systematische Überschätzung der PAR durch den verwendeten Ansatz auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Für diesen Test wurde die auf ECMWF-Analysen basierende PAR durch Stationswerte ersetzt. Die restlichen Antriebsdaten stammen weiterhin aus den in Kapitel 3 vorgestellten Datensätzen. Wie im vorherigen Abschnitt wurden LAI und Landnutzung wieder mit den Stationswerten korrigiert. Abbildung 5.20 zeigt die Jahreswerte der NEP für diesen Test. Die Korrelation der Jahreswerte ist noch einmal leicht verbessert. Wie zu erwarten, sind die Werte der NEP für alle Stationen deutlich reduziert (Tabelle A.5, Anhang). Die Größenordnung der Änderungen ist jedoch unterhalb derer, die durch die Fehlklassifikation der Landnutzung und die Überschätzung des LAI bedingt sind. Die Differenzen der Tageswerte sind, wie aus dem Vergleich von Abbildung 5.21 zu sehen ist, wieder geringer geworden. Die Saisonalität der Abweichungen bleibt jedoch erhalten. Dies ist jedoch auch zu erwarten, wenn man sich vor Augen hält, dass der Kontrolllauf das gleiche Verhalten aufweist (Abbildung 5.2).

5.4 Verwendung von Globalstrahlung

BETHY lässt als Eingangsdaten für die kurzwellige Strahlung zwei Optionen zu: Zum einen das Tagesmittel des Verhältnisses aus aktueller und potentieller PAR, zum anderen das Tagesmittel der Globalstrahlung. Die PAR wurde aus ECMWF-Analysen der Bewölkung abgeleitet. Das ECMWF liefert jedoch auch Vorhersagen der Globalstrahlung für verschiedene Zeiträume nach

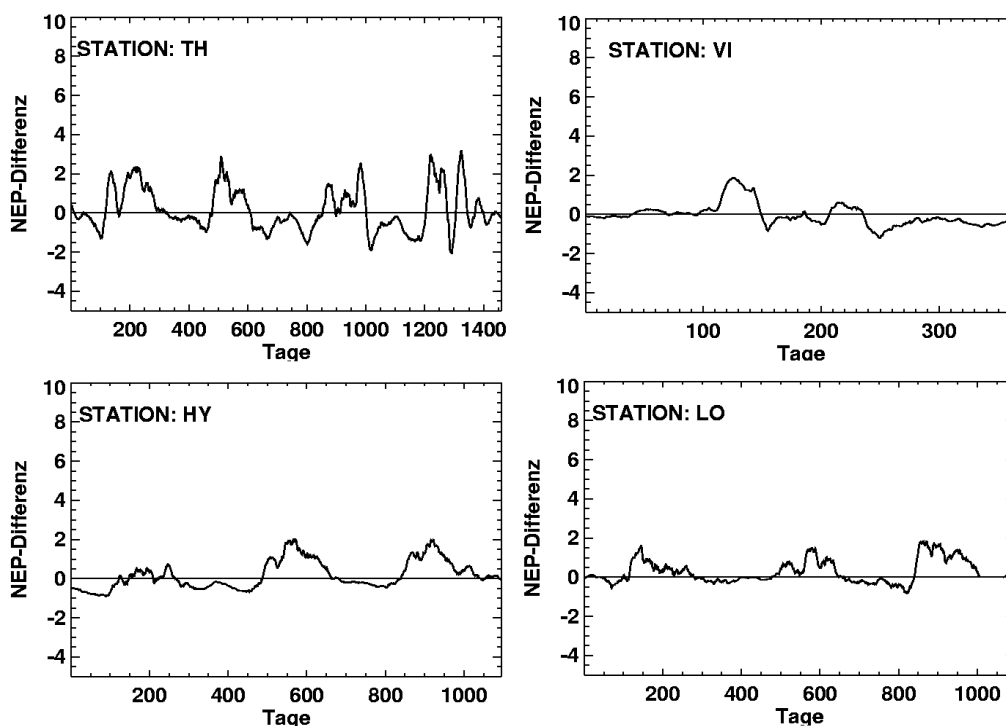


Abbildung 5.21: TEST, LAI+LCC+PAR: Zeitreihen der Differenz aus der gemessenen und modellierten NEP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Tag}$) für den Test mit gemessenen PAR-Zeitreihen als gleitendes Mittel über 30 Tage.

den Analysen. Es ist daher sinnvoll zu testen, ob sich der Aufwand einer separaten Prozessierung der PAR lohnt, oder ob nicht besser gleich die Tageswerte der vom ECMWF prognostizierten Globalstrahlung verwendet werden sollten. Daher wurden Tageswerte der Globalstrahlung aus den ERA40-Reanalysen zu einem Testlauf verwendet. Wie die aus der Bewölkung hergeleitete PAR besitzen die Werte der Globalstrahlung eine Auflösung von 0.5° , liegen jedoch bereits als Tageswerte vor. Abbildung 5.23 zeigt einen Vergleich zwischen der Globalstrahlung der ERA40-Reanalysen und den Stationswerten. Die Korrelation zwischen beiden Werten ist deutlich schlechter als im Falle der aus Bewölkung abgeleiteten PAR. Weiterhin ist die Streuung der Tageswerte um die 1:1 Gerade wesentlich größer. Grund für die im Vergleich zur PAR schlechtere Übereinstimmung zwischen beiden Werten ist, dass die Globalstrahlung aus Modellvorhersagen stammt. In den vom ECMWF modellierten Strahlungstransport gehen die Vorhersagen der Bewölkung ein. Diese ist jedoch eine der Größen mit der höchsten Ungenauigkeit. Fehler in den Prognosen der Bewölkung setzen sich dementsprechend in der Modellierung des Strahlungstransportes fort. Dagegen beruhen die in dieser Arbeit ver-

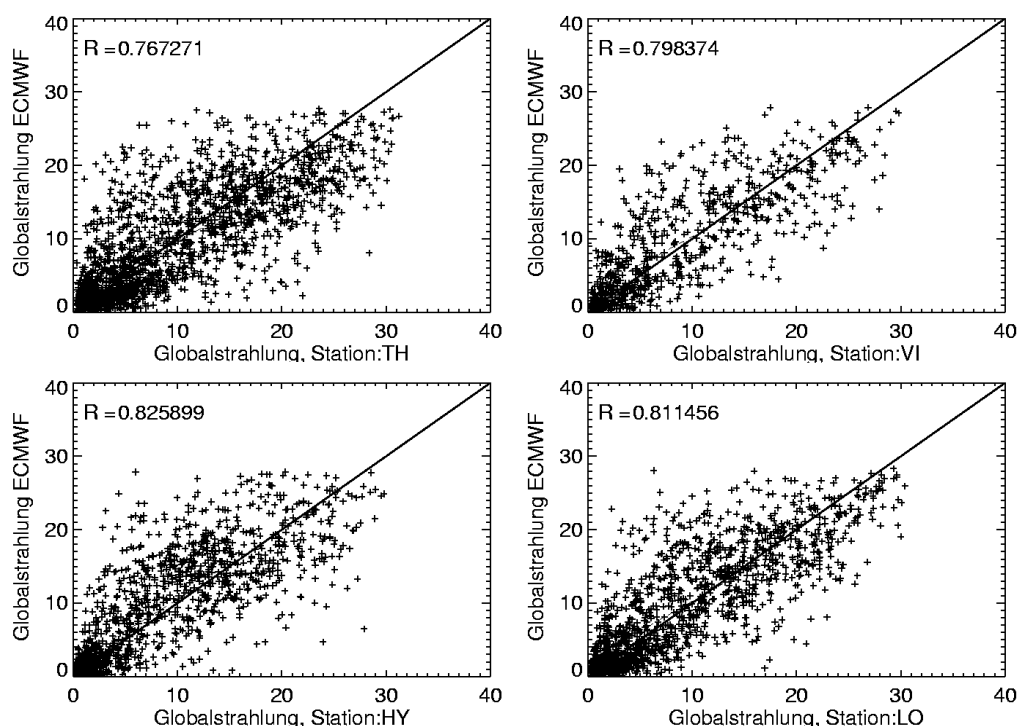


Abbildung 5.22: TEST, GLOB: Streudiagramme der Globalstrahlung aus ECMWF-Reanalysen gegen die Tageswerte der CARBOEUROPE-Stationen in ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{Tag}$).

wendeten Werte der PAR auf Analysen der Bewölkung und damit auf dem beobachteten „Ist“-Zustand, der genauer ist als die modellierten Werte. Im Mittel stimmen die Werte der Reanalysen dagegen gut mit den Messwerten überein. Dies wird in den Vergleichen der Jahreswerte ersichtlich (Abbildung 5.24). Nur für ein Simulationsjahr der Station Hyytiala ergibt sich eine Überschätzung der Globalstrahlung, während in den anderen Fällen die Jahreswerte gut mit den Stationsdaten korrelieren.

Für diesen Test wurden die Werte von LAI und Landnutzung an die Stationswerte angepasst (siehe Kapitel 5.3.2 und 5.3.3.). Abbildung 5.25 zeigt die Ergebnisse dieser Simulationen. Auffallend ist, dass im Unterschied zu den vorhergehenden Simulationen die NEP unterschätzt wird. Auch die gemittelten Zeitreihen der NEP zeigen eine fast durchgehende Unterschätzung der NEP. Dies ist zunächst überraschend, da die Globalstrahlung zumindest im Mittel gut mit den Tageswerten übereinstimmt. Macht man sich jedoch die nichtlineare Abhängigkeit der Photosynthese von der solaren Einstrahlung klar und nimmt Abbildung 5.22 zu Hilfe, so wird der Zusammenhang klar:

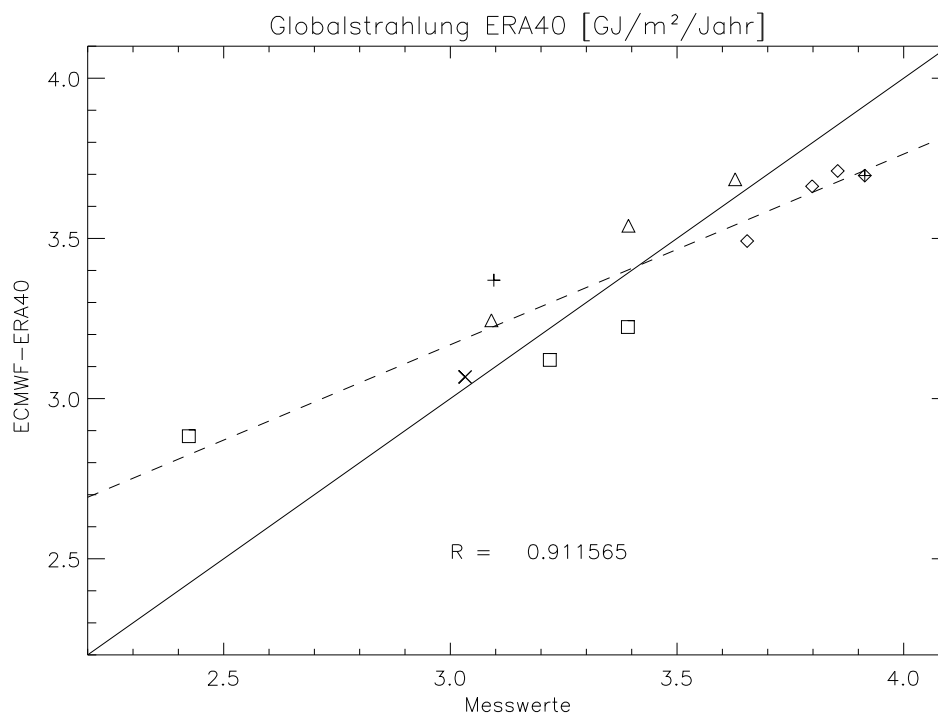


Abbildung 5.23: TEST, GLOB: Streudiagramme der Jahreswerte der Globalstrahlung aus den ECMWF-Reanalysen gegen die Tageswerte der CARBOEUROPE-Stationen in ($GJ/m^2/Jahr$). \diamond : Tharandt, Δ : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

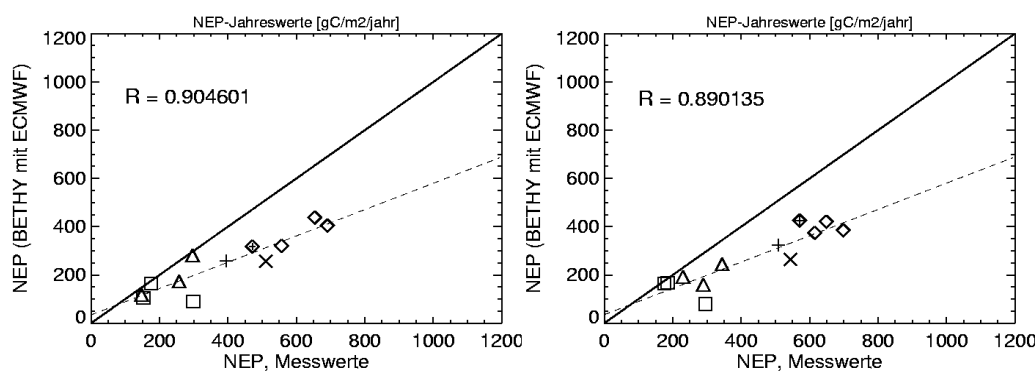


Abbildung 5.24: TEST, GLOB: Vergleich der gemessenen und simulierten Jahreswerte der NEP für den Test mit Globalstrahlung aus den ERA40-Reanalysen. \diamond : Tharandt, Δ : Loobos, \square : Hyytiala, \times : Aberfeldy.

Die Globalstrahlung weist eine gleichermaßen starke positive und negative Streuung auf. Da die Photosynthese jedoch mit zunehmender Sonnenein-

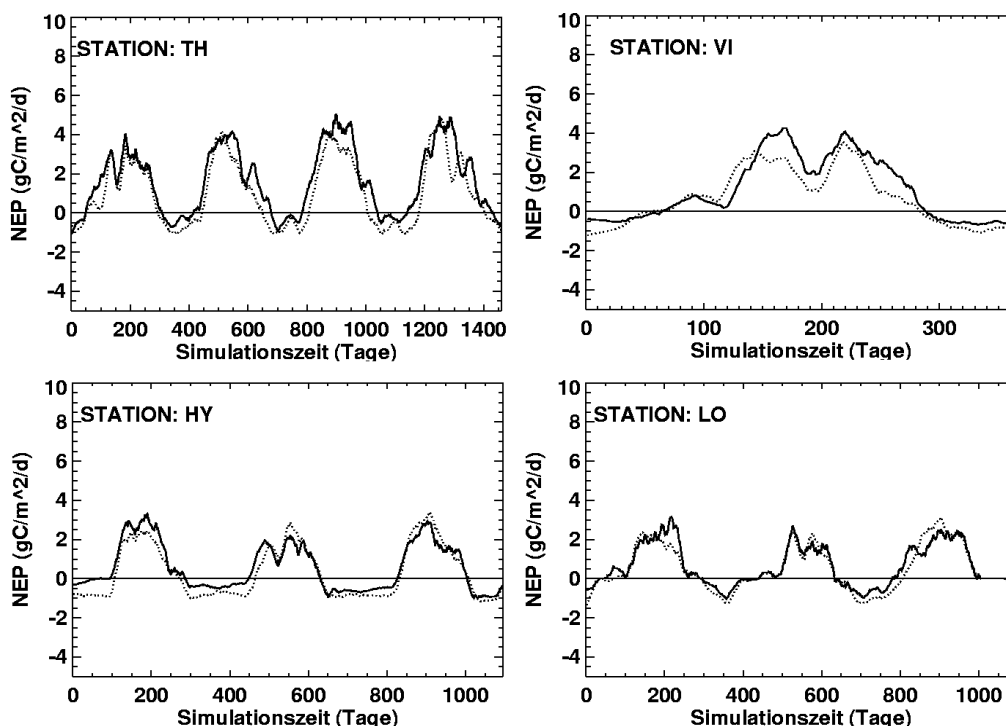


Abbildung 5.25: TEST, GLOB: Zeitreihen der von BETHY simulierten Tageswerte der NEP und der Tageswerte der CARBOEUROPE-Stationen in ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Tag}$) als gleitendes Mittel über 30 Tage.

strahlung in Sättigung geht, sind die Auswirkungen der Überschätzung nach oben beschränkt. Dagegen kann sich die Unterschätzung der PAR fast ungehindert auf die Modellierung der Photosynthese auswirken. Auch wenn sie im Mittel gut mit den Messwerten übereinstimmt, zeigt dieses Ergebnis, dass die Globalstrahlung aus den ERA40-Reanalysen keine ausreichende Genauigkeit für die Modellierung der Photosynthese aufweist.

5.5 Zusammenfassung

Um festzustellen wie gut die Simulationsergebnisse mit Messwerten der NEP übereinstimmen, wurde eine Evaluierung des Modells mit Stationswerten des CARBOEUROPE-Messnetzes durchgeführt. Dazu wurde zunächst ein Kontrolllauf durchgeführt, der eine systematische Überschätzung der NEP durch BETHY offenbarte. Diese lässt sich zumindest teilweise durch die Parametrisierung der Tagesgänge und durch die im Modell verwendete Randbedingung des konstanten atmosphärischen CO_2 -Gehaltes erklären. Die Simulatio-

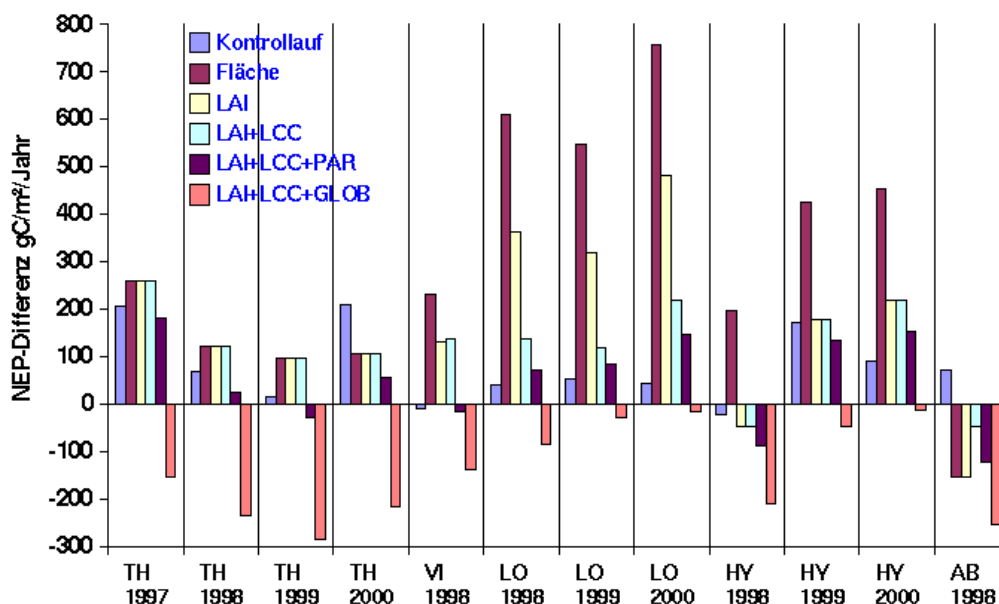


Abbildung 5.26: Zusammenfassung der Tests: Dargestellt sind die Abweichungen der NEP-Jahreswerte zwischen Modell und Stationen. Verwendet wurden die reduzierten Zeitreihen. Bei Stationen mit mehreren Simulationsjahren sind die einzelnen Jahre separat dargestellt. Fläche bezeichnet den Test mit Flächendaten als Antrieb, LAI, LCC, PAR und GLOB kennzeichnen die Tests mit Korrekturen der entsprechenden Eingangsdaten (LAI, Landnutzung, photosynthetisch aktive Strahlung und Globalstrahlung).

nen mit ECMWF-Daten für den meteorologischen Antrieb, der Landnutzung nach PELCOM und den LAI Zeitreihen der Universität Boston offenbarte deutliche Schwachpunkte in den Zeitreihen des LAI und der Klassifikation der Landnutzung. So ist die grobe Auflösung der LAI-Zeitreihen nur bedingt kompatibel zu der hochauflösten Landnutzungs-klassifikation. Weiterhin ist an zwei Stationen (Hyytiala und Loobos) der LAI deutlich zu niedrig was zu einer deutlichen Überschätzung der NEP führt. Ebenso trägt die Fehlklassifikation der Landnutzung in einem Fall (Loobos) zusätzlich zu einer deutlichen Überschätzung der NEP bei. Dagegen wirken sich relativ geringe Unterschätzungen im oberen Wertebereich des LAI (Tharandt) nur in geringem Maße auf die simulierte NEP aus. Dies macht die Notwendigkeit eines höher aufgelösten LAI deutlich, der außerdem mit der verwendeten Klassifikation der Landnutzung abgestimmt sein sollte.

Die aus den ECMWF-Analysen der Bewölkung berechnete PAR offenbart eine systematische Überschätzung, im Gegensatz zur Globalstrahlung aus den ERA40-Reanalysen. Bei dieser ist die Streuung der Tageswerte deut-

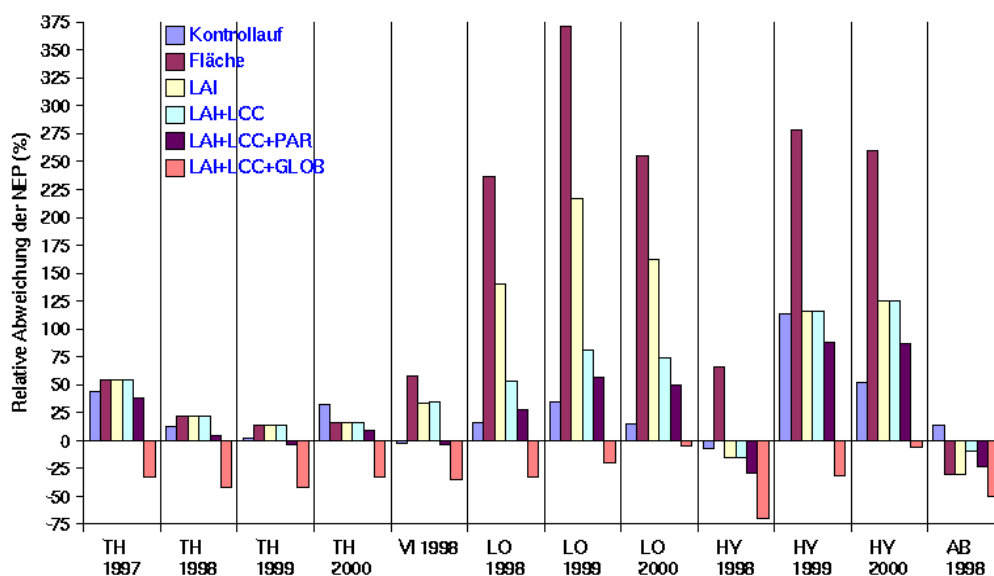


Abbildung 5.27: Wie Abbildung 5.19, jedoch für die relativen Abweichungen der modellierten NEP von den Stationsdaten.

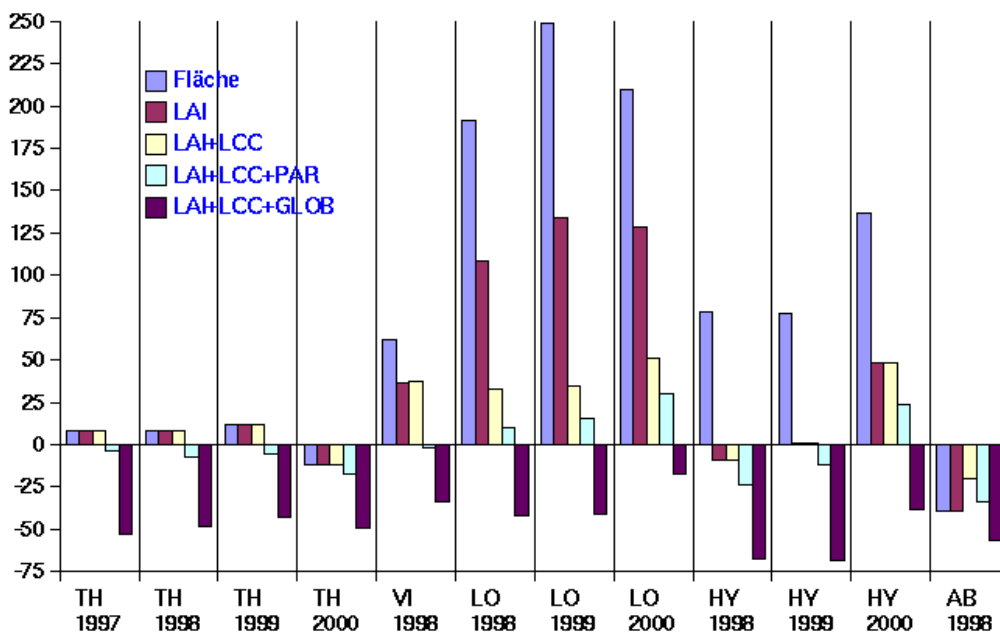


Abbildung 5.28: Relative Abweichungen der in den Flächensimulationen modellierten NEP vom Kontrolllauf.

lich größer und die Korrelation mit den Messwerten geringer. Dafür ist die Übereinstimmung im 30tägigen Mittel besser als bei der PAR ohne Korrek-

tur des systematischen Offset. Die Verwendung der Globalstrahlung aus den ERA40-Datensätzen führt jedoch zu einer systematischen Unterschätzung der simulierten NEP. Daher ist die aus den Analysen der Bewölkung berechnete PAR der modellierten Globalstrahlung vorzuziehen. Die systematische Überschätzung kann durch die Verwendung einer Korrektur kompensiert werden, die aus einer Regression der Stationsdaten ermittelt werden kann.

Die aus den ECMWF-Analysen ermittelten Tageswerte der Temperatur weisen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten auf. Die Korrelation ist in den meisten Fällen sehr gut, systematische Abweichungen ergeben sich vor allem durch die sehr variablen Standortbedingungen, die auch durch die Skalierung mit der Elevation aus einem digitalen Höhenmodell nur schwer erfasst werden können. Die täglichen Niederschlagssummen aus den ERA40-Reanalysen zeigen durchweg zu niedrige Werte im Vergleich mit den Stationsdaten. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie aus Kapitel 4.3 lassen jedoch den Schluss zu, dass die Auswirkung auf die Simulationsergebnisse nur gering sind. Dies ist dadurch erklärbar, dass für die hier betrachteten Standorte nicht die Wasserverfügbarkeit der wesentliche limitierende Faktor der Photosynthese ist, sondern das Licht (Nemani et al., 2003). Im Falle der Bodenrespiration dominiert dagegen der Einfluss der Temperatur über dem der Bodenfeuchte.

Abbildung 5.27 bis 5.28 zeigen die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den Stationswerten für die reduzierten Zeitreihen. In Abbildung 5.29 wird zusätzlich noch die Abweichung der Testläufe von Kontrolllauf dargestellt. Bei den Tests mit korrigierter Landnutzung und LAI liegen die Ergebnisse in der gleichen Größenordnung wie beim Kontrolllauf. Die größten Überschätzungen ergeben sich beim Test mit Flächeninput ohne jegliche Korrektur und bei dem Test, für den nur der LAI korrigiert wurde. Für die Stationen Loobos und Vielsalm wirkt sich zusätzlich dazu die Ersetzung der PAR durch Stationsdaten vorteilhaft auf die Ergebnisse aus: Die Überschätzungen werden hier noch einmal deutlich reduziert. Bei der Station Tharandt bewirkt der Test der PAR dagegen eine leichte Unterschätzung der ansonsten in der Größenordnung des Kontrolllaufes liegenden Werte. Dagegen ergibt sich bei Verwendung der ERA40-Reanalysen für die Globalstrahlung (und gleichzeitiger Korrektur von Landnutzung und LAI) eine systematische Unterschätzung der NEP-Jahreswerte.

Kapitel 6

Regionale CO₂-Bilanzierung

6.1 Die CO₂-Bilanz von Deutschland

Da das Ziel dieser Arbeit die Vorbereitung künftiger operationeller Schätzungen der NPP und NEP ist, soll an dieser Stelle ein erster regionaler Test durchgeführt werden. Um den Simulationsaufwand in Grenzen zu halten, gleichzeitig aber das Verhalten des Modells und die Auswirkungen der verwendeten Datensätze auf einem größeren Gebiet zu studieren, wurde als Simulationsgebiet Deutschland gewählt. Das Simulationsjahr war 1998.

Als Modellgitter diente das 1 km Gitter der PELCOM-Landnutzung. Wie schon bei den Simulationen zur Evaluierung des Modells wurde darauf verzichtet, die Daten mittlerer Auflösung (LAI und meteorologischer Antrieb) auf das 1 km Gitter der PELCOM-Landnutzung zu interpolieren. Die Daten wurden mit dem PELCOM-Gitter verschnitten (gekachelt). In Abb. 6.1 sind die Jahreswerte der NPP für Deutschland dargestellt. Der Wertebereich der NPP bewegt sich zwischen 500 und 1200 gC/m²/Jahr. Auffallend sind die Gebiete mit hohen Werten der NPP im Norden und Süden Deutschlands. Ein Vergleich mit der Landnutzung ergibt, dass diese Gebiete als Grasland klassifiziert sind. Grasland besitzt eine im Vergleich zu Nadelwäldern höhere Produktivität (Knorr, 1997). Eine Überschätzung der NPP durch die verwendeten Zeitreihen des LAI ist jedoch nicht auszuschließen. Die grobe Auflösung von 16 km kann zum einen dazu führen, dass in der Nähe zu Waldgebieten der LAI eher für solche repräsentativ ist, als für Grasland. Weiterhin ist Grasland in Deutschland weitgehend landwirtschaftlich genutzt und weist daher starke Schwankungen im LAI auf, die von den Monatswerten nicht mehr erfasst werden können. Starke Einbrüche im LAI, beispielsweise durch Abmähen der Grasflächen oder die Verwendung als Viehweide gehen dadurch verloren. In den verwendeten Zeitreihen nimmt der LAI auch über den Graslandgebieten

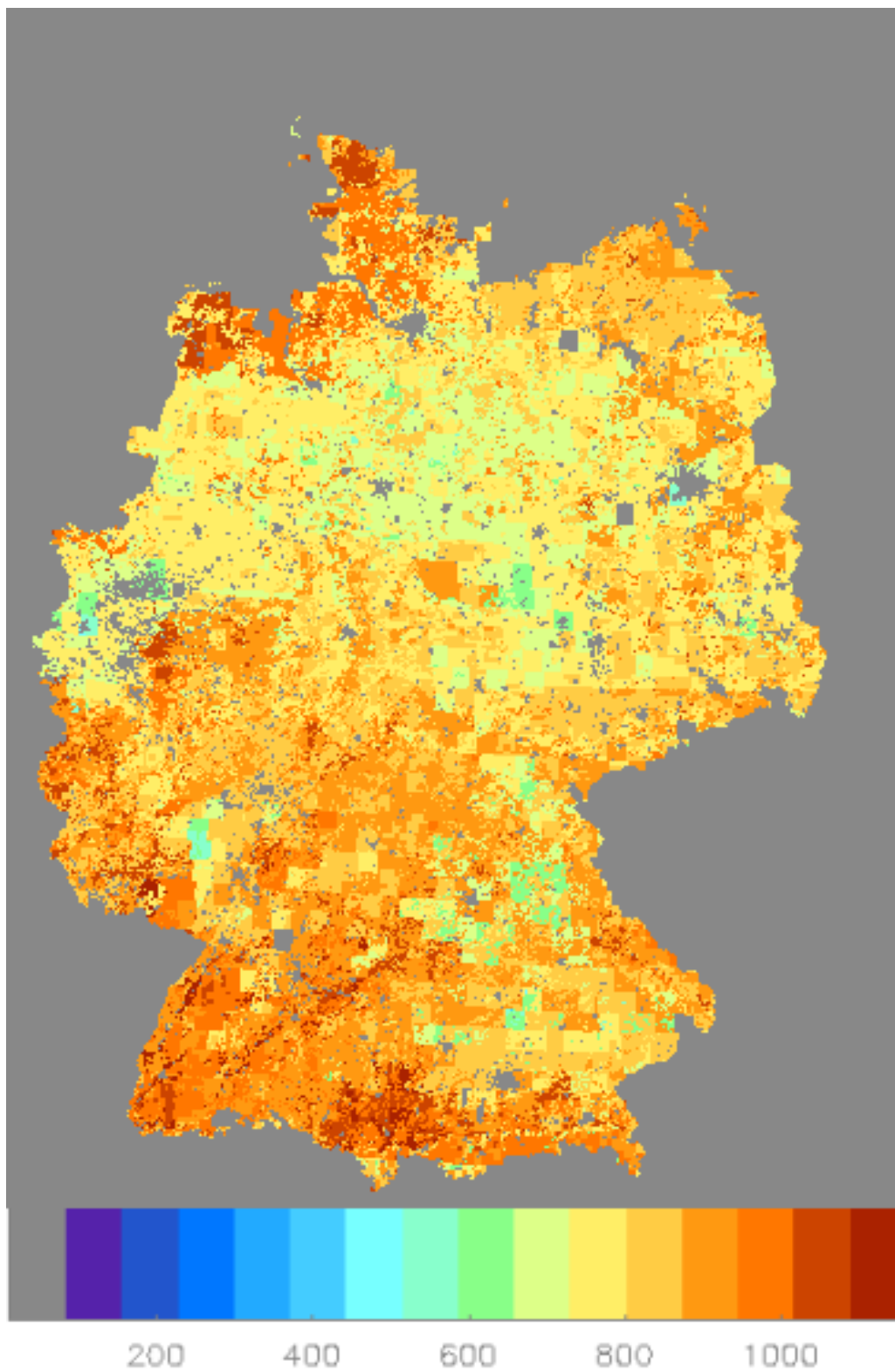


Abbildung 6.1: Ergebnisse der Simulation der NPP-Jahreswerte (gC/m²/Jahr) von Deutschland für das Jahr 1998

Landnutzung	Zahl der Pixel	GPP (TgC/Jahr)	NPP (TgC/Jahr)	NEP (TgC/Jahr)
Nadelwald	38861	59	39	29
Laubwald	26848	51	29	22
Mischwald	27505	43	28	21
Grasland	25242	47	30	24
Ackerland	150946	337	143	103
Feuchtgebiete	3026	4	3	2
Wald gesamt	93214	154	96	72

Tabelle 6.1: Jahressummen von GPP, NPP und NEP für Deutschland, aufgeschlüsselt nach der Landnutzung.

Landnutzung	Zahl der Pixel	GPP (gC/m ² /Jahr)	NPP (gC/m ² /Jahr)	NEP (gC/m ² /Jahr)
Nadelwald	38861	1265	830	620
Laubwald	26848	1576	897	682
Mischwald	27505	1306	851	628
Grasland	25242	1553	994	798
Ackerland	150946	1843	782	565
Feuchtgebiete	3026	1035	691	516
Wald gesamt	93214	1382	859	643

Tabelle 6.2: Durchschnittliche Jahressummen von GPP, NPP und NEP für Deutschland, aufgeschlüsselt nach der Landnutzung.

einen Maximalwert von LAI=6 an. Scurlock et al. (2001) untersuchten weltweite Messungen des LAI in einem Zeitraum von 1932 bis 2000 und kamen für Grasland zu einem Mittelwert von LAI=2,6. Leahy et al. (2004) fanden bei Messungen über landwirtschaftlich genutztem Grasland in Irland eine NEP von $9,45 \text{ TCO}_2/\text{ha}$ (entsprechend $258,2 \text{ gC/m}^2/\text{Jahr}$) was deutlich unterhalb der simulierten Werte liegt (Tab. 6.2 und Abb. 6.3). Die hohe Werte der NPP in diesen Gebieten sind zwar nicht generell unmöglich, sollten aber mit Vorsicht behandelt werden.

Eine Verbesserung von Seiten der Eingangsdaten ist durch die künftige Verwendung der LAI-Zeitreihen von 1 km Auflösung zu erwarten. Leider sind bisher fast alle verfügbaren Messstationen repräsentativ für den CO₂ Austausch über Wäldern, so dass eine sinnvolle Evaluierung des Modells für andere Vegetationstypen (Grasland, landwirtschaftlich genutzte Flächen, Feuchtgebiete)

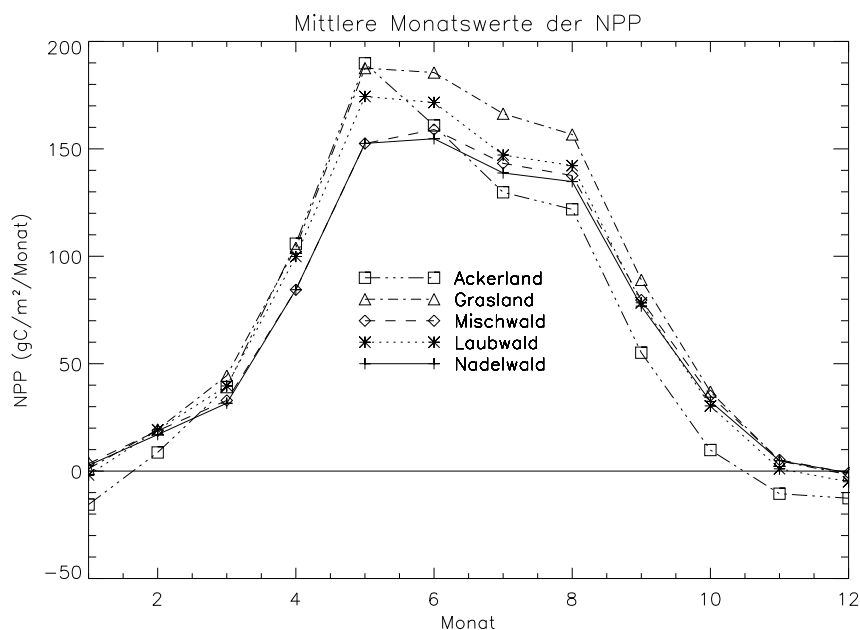


Abbildung 6.2: Über alle Pixel der Landbedeckungsklassen Ackerland, Grasland, Mischwald, Laubwald und Nadelwald gemittelte Monatswerte der NPP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Monat}$).

nur schwer möglich ist.

Weiterhin gut erkennbar auf der Abbildung sind Gebiete mit mittlerer bis hoher Produktivität, die Waldgebieten zuzuordnen sind. Beispiele sind der Bayerische Wald an der Südostgrenze Deutschlands, der Harz und die Waldgebiete der Mittelgebirge (z.B. Eifel und Hunsrück), sowie der Schwarzwald im Südwesten Deutschlands. Negativ fällt in der Nähe der Küsten die grobe Auflösung der LAI-Zeitreihen auf, die in Konflikt mit der hohen Auflösung der Land-See-Maske gerät. Die Verwendung eines Interpolationsschemas, bzw. eines Algorithmus zum Füllen von Datenlücken wäre hier sinnvoll gewesen. Die Gebiete mit landwirtschaftlicher Nutzung besitzen die geringste Produktivität. In Tabelle 6.1 sind die Jahres- und Flächensummen von GPP, NPP und NEP nach der Landnutzung aufgeschlüsselt zusammengefasst. Dazu wurden die in $\text{gC}/\text{m}^2/\text{Jahr}$ berechneten Werte, die Flächenmittel auf dem 1 km Gitter darstellen, auf die Gesamtfläche aller Pixel hochgerechnet. Angegeben ist zusätzlich die Anzahl der Pixel der unterschiedlichen Landnutzungsklassen. Die Einheit von GPP, NPP und NEP ist daher $\text{TgC}/\text{Klasse}/\text{Jahr}$. Im unteren Abschnitt sind die Waldklassen Nadelwald, Laubwald und Mischwald zur Klasse Waldgebiete zusammengefasst. Auf eine Skalierung der Ergebnisse mit den Abweichungen aus der Evaluie-

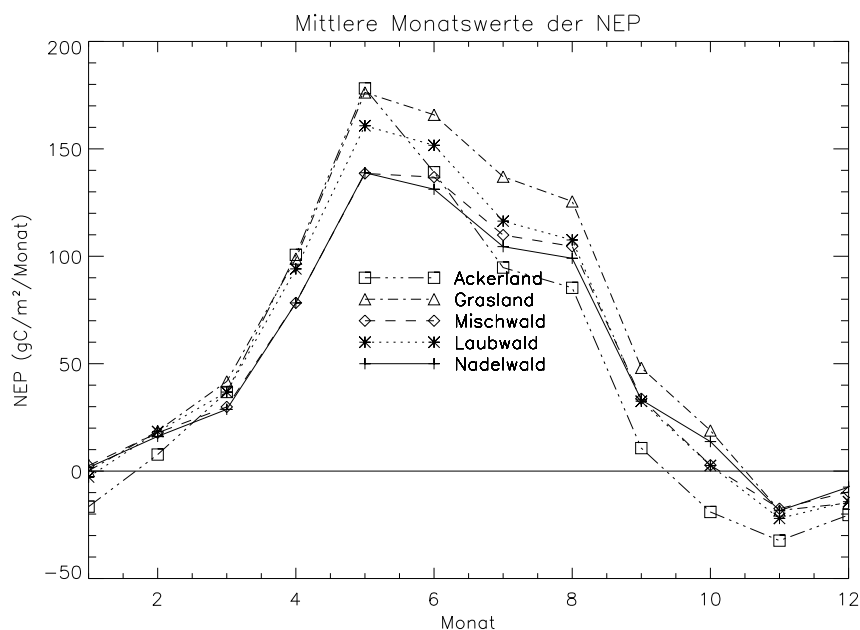


Abbildung 6.3: Über alle Pixel der Landbedeckungsklassen Ackerland, Grasland, Mischwald, Laubwald und Nadelwald gemittelte Monatswerte der NPP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Monat}$).

Die Darstellung der NEP-Werte soll hier verzichtet werden, da dies ein genaues Kenntnis darüber voraussetzt, wie groß die Abweichung von LAI und Landnutzung an jedem Pixel ist. Dies ist jedoch nur für Pixel möglich, an denen sich Stationen befinden. Um sinnvolle allgemeingültige Annahmen über die Abweichungen zu machen, sind bisher zu wenige Stationsdaten vorhanden. Sehr hohe Werte der NEP-Jahressummen ergeben sich für die landwirtschaftlichen Anbaugelände. Diese besitzen jedoch auch den größten Anteil an der Gesamtfläche. Weiterhin wurde aus Kapitel 5.5 ersichtlich, dass durch die grobe zeitliche und räumliche Auflösung der LAI-Daten die Werte deutlich überschätzt werden können. Daher sind diese Ergebnisse mit Skepsis zu betrachten. Für Waldgebiete und Grasland liegen die Ergebnisse in der gleichen Größenordnung, die Flächenanteile dieser Klassen sind am geringsten für Mischwald und am größten für Nadelwald. Trotz des geringeren Flächenanteils ist die Gesamtaufnahme von Grasland höher als die von Laub- und Mischwald. Einen genaueren Einblick in die Produktivität der einzelnen Landnutzungsklassen erhält man, wenn man sich in Tabelle 6.2 die Durchschnittswerte der einzelnen Klassen anschaut. Grasland weist die höchsten Durchschnittswerte auf, gefolgt von Laub- und Mischwald. Die im Schnitt geringsten Produktivitäten ergeben sich für Feuchtgebiete und landwirtschaftlich genutzte Gebiete. Leider kann-

te im Rahmen dieser Arbeit keine Evaluierung für Grasland, Feuchtgebiete oder Ackerland durchgeführt werden, da es bisher noch keine kontinuierlichen Messreihen (vergleichbar der CARBOEUROPE-Messungen) der CO₂ Aufnahme für diese Landnutzungsklassen gibt. Um eine vollständige Beschreibung der CO₂ basierten Kohlenstoffbilanz und ihrer Genauigkeit bei der Modellierung zu erhalten, wären kontinuierliche Messreihen (wie bei Leahy et al., 2004) für diese Gebiete sehr von Vorteil.

Für die Waldgebiete Deutschlands ergibt sich insgesamt ein Wert von 72,17 TgC/Jahr. Dieser Wert liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der von Veroustrate (2002, 53,99 TgC/Jahr für 1997). Die hier angegebenen Werte beziehen sich nur auf den durch CO₂ bedingten Anteil der Kohlenstoffbilanz. Da weiterhin keine Speicherung von Kohlenstoff simuliert wird, beinhaltet die in dieser Arbeit modellierte Bilanz nur den Austausch in einem Gleichgewicht des Ökosystems, ohne Störungen durch Vegetationsfeuer, Windbruch oder Abholzungen. Dies ist beim Vergleich mit anderen Kohlenstoffbilanzierungen zu beachten.

In Abbildung 6.2 und 6.3 sind die Monatswerte von NPP und NEP als Mittelwert für verschiedene Klassen der Landnutzung dargestellt. Die zugehörigen Pixel wurden zufällig aus dem Datensatz ausgewählt. Auffällig ist bei NPP und NEP der starke Abfall ab dem Monat Mai und die nur geringe Abnahme für Juli und August. Zurückzuführen ist dies darauf, dass bei vielen landwirtschaftliche Nutzpflanzen ab Juni bereits der größte Wachstumsgrad überschritten ist. Die Produktivität der Klasse Grasland ist im Sommer am größten während die Unterschiede zwischen den Klassen im Frühjahr und Herbst nicht allzu groß sind. In den Zeitreihen der NEP ist gut zu erkennen, dass die Produktivität von Laubwäldern im Sommer größer als die von Nadelwäldern ist, während die Verhältnisse sich ab den Herbstmonaten leicht umkehren.

Weiterhin sollen nun die Abhängigkeiten zwischen der NPP und den Antriebsgrößen untersucht werden. Dazu werden die Monatswerte der NPP als Streudiagramm gegen die Monatswerte der wichtigsten Antriebsdaten aufgetragen. Dies geschieht getrennt nach den Landnutzungsklassen Laubwald, Nadelwald, Mischwald und Grasland. Die einzelnen Monate sind in jeweils unterschiedlichen Farben dargestellt. Die Abhängigkeit der Nettophotosynthese vom LAI zeigt die typische Sättigungskurven. Die höchsten Werte der NPP ergeben sich wie zu erwarten für die Sommermonate. Hier fällt auch auf, dass sich kaum Abhängigkeiten für niedrige Werte des LAI ergeben, da im Sommer speziell für Waldgebiete eher hohe Werte des LAI vorkommen. In den Wintermonaten dagegen ist die Abhängigkeit vom LAI fast linear und zeigt kaum Variationen. Für die Abhängigkeit von der Globalstrahlung ergeben sich wie beim LAI Sättigungskurven, die jedoch eine stärkere Streuung

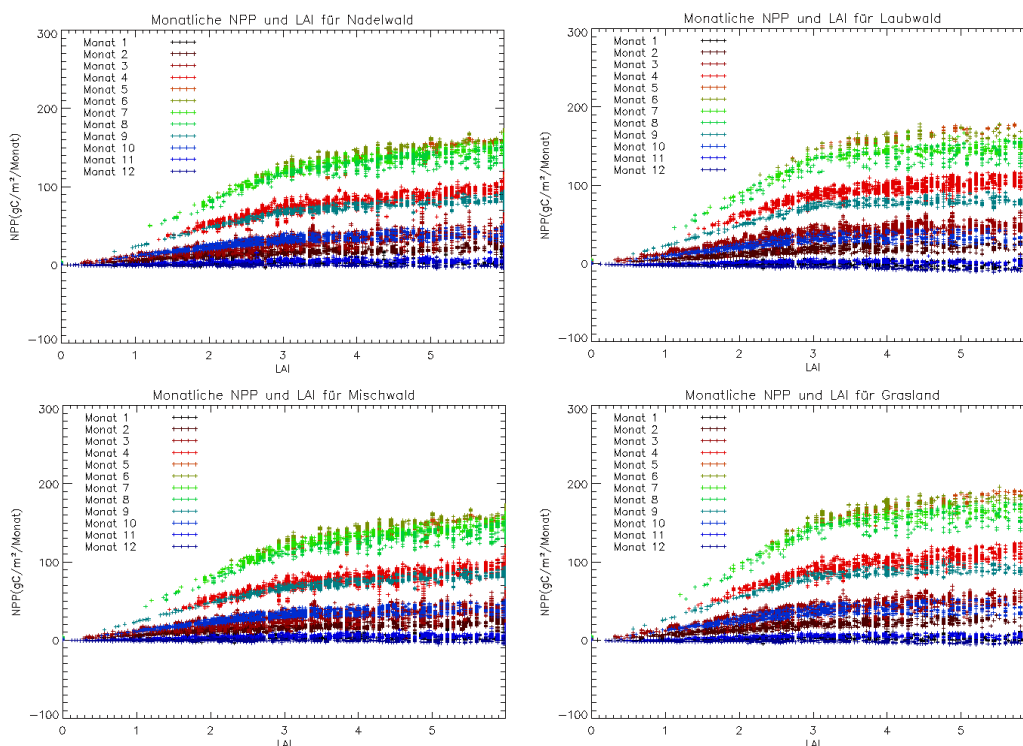


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der NPP-Monatssummen von den Monatswerten des LAI, aufgeteilt nach den Landnutzungsklassen Nadelwald, Laubwald, Mischwald und Grasland für jedes Pixel der entsprechenden Klasse

aufweisen. Die Begrenzung nach oben gibt eine maximal mögliche NPP an, für die sich Abweichungen nur nach unten durch Stressbedingungen (Wasserstress, Temperaturlimitierung) ergeben. Für die Abhängigkeit von den Monatsmitteltemperaturen ergeben sich die erwarteten Sättigungskurven mit Abnahme der NPP für höhere Temperaturen, die sich durch die Zunahme der autotrophen Respiration ergibt. Für Temperatur und Globalstrahlung sind die Streuungen der NPP für bestimmte Werte deutlich größer als bei der Abhängigkeit vom LAI, die Beziehungen zwischen den Größen sind hier weniger eng. Streudiagramme dieser Art können dazu dienen, statistische Beziehungen oder Lookup-Tables zwischen der NPP und den Antriebsgrößen LAI, Strahlung, Temperatur herzustellen, mittels derer eine schnelle Abschätzung der NPP vorgenommen werden kann.

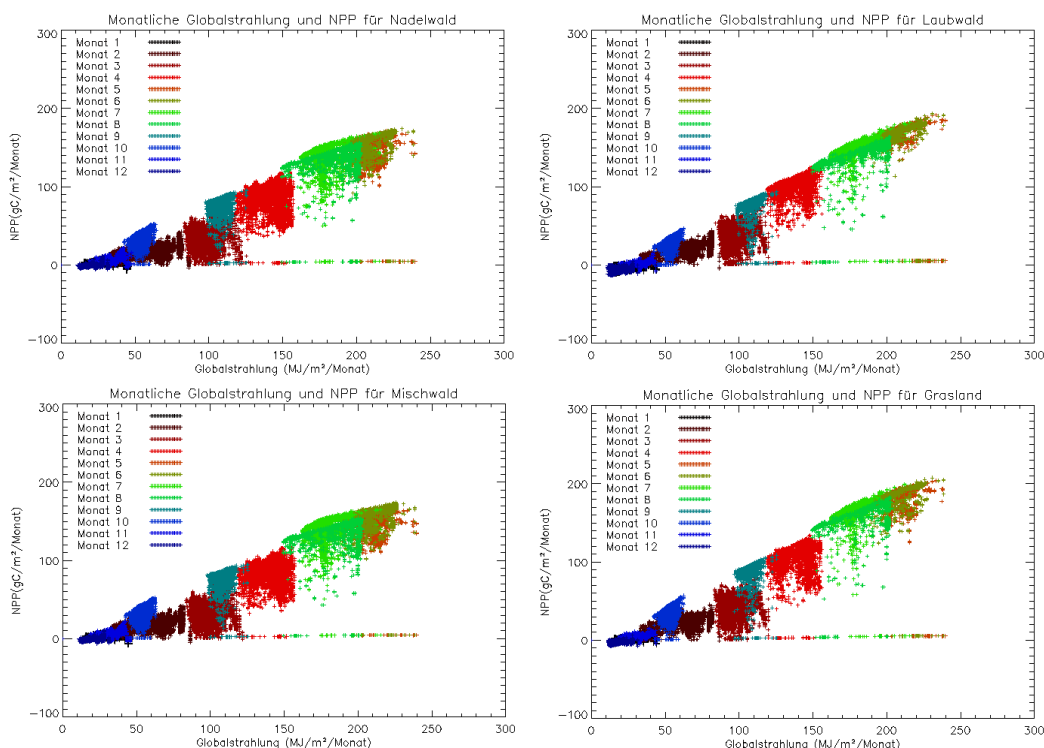


Abbildung 6.5: Abhängigkeit der NPP-Monatssummen von den Monatssummen der Globalstrahlung, aufgeteilt nach den Landnutzungsclassen Nadelwald, Laubwald, Mischwald und Grasland für jedes Pixel der entsprechenden Klasse

6.2 Ein erster Test neuer LAI-Zeitreihen

Aus den vorhergehenden Kapiteln wird ersichtlich, dass die Verwendung von Zeitreihen des LAI mit einer räumlichen Auflösung von 16 km und einer zeitlichen Auflösung von einem Monat für regionale Bilanzierungen größere Fehler aufweist. Dies beruht zum einen darauf, dass Vegetationsklassen wie Grasland und landwirtschaftliche Nutzflächen eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität besitzen. Zum anderen führt die höhere Auflösung der Landnutzung zu Unstimmigkeiten mit den LAI-Zeitreihen.

Daher wird in diesem Abschnitt die Verwendung von LAI-Zeitreihen getestet, die mit der verwendeten Landnutzung abgestimmt sind. Dazu werden die am DFD vorhandenen Wochenkomposite des NDVI aus NOAA-AVHRR-Daten verwendet, um Zeitreihen des LAI im Zeitschritt von einer Woche und mit einer räumlichen Auflösung von 1 km abzuleiten. Die Wochenkomposite des NDVI liefern jedoch keine kontinuierlichen Zeitreihen, da durch Bewölkung oft über weite Zeiträume keine Messungen vorliegen. Zum Füllen

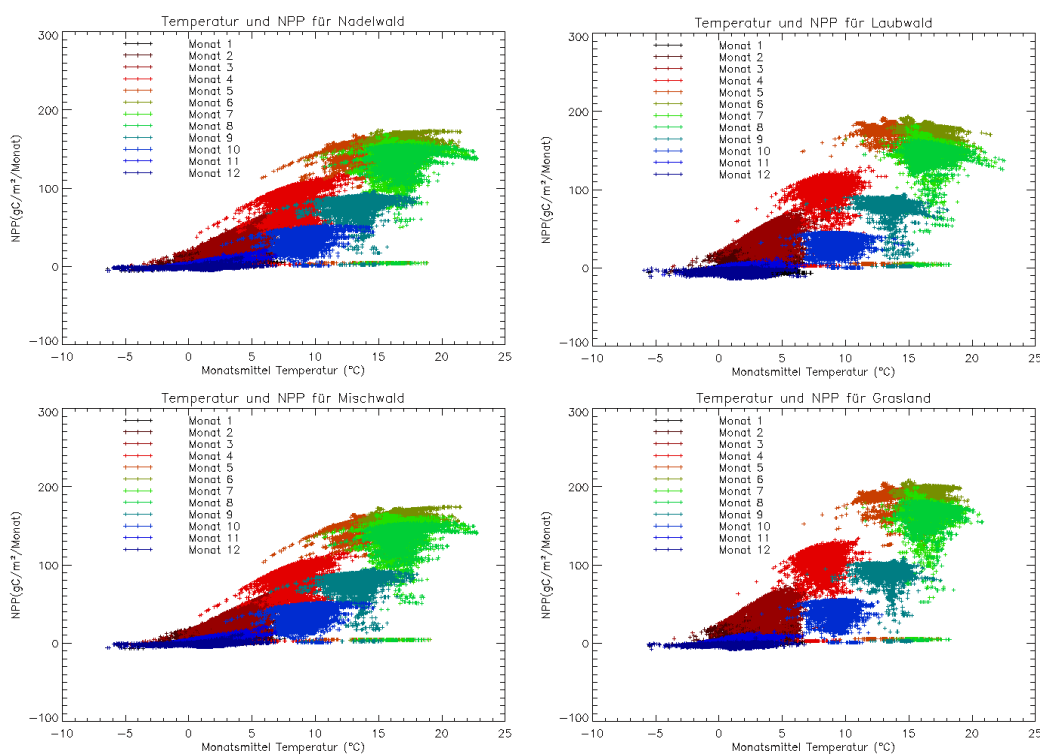


Abbildung 6.6: Abhängigkeit der NPP-Monatssummen von den Monatsmitteln der Temperatur, aufgeteilt nach den Landnutzungsklassen Nadelwald, Laubwald, Mischwald und Grasland für jedes Pixel der entsprechenden Klasse

der Datenlücken wird eine harmonische Analyse auf die Zeitreihen angewendet (Bittner et al, 1994, Meisner et al. 1999). Bei dieser Art von Zeitreihenanalyse wird, ähnlich einer Fouriertransformation, davon ausgegangen, dass sich die Zeitreihe als Überlagerung einer diskreten Anzahl von harmonischen Funktionen darstellen lässt. Der Vorteil ist, dass die harmonische Analyse Datenlücken behandeln kann, die in unregelmäßigen Abständen vorhanden sind. Abbildung 6.7 zeigt die Zeitreihen des NDVI vor und nach der Zeitreihenanalyse. Aus den auf diese Weise geglätteten Zeitreihen des NDVI werden mit dem Algorithmus nach Sellers (1996) die Werte des LAI berechnet. Die dafür notwendigen Informationen über die Verteilung der Vegetationstypen wird aus der PELCOM-Klassifikation übernommen. Abbildung 6.10 (links oben) zeigt die PELCOM-Landnutzung für das Simulationsgebiet. In der Bildmitte ist der Tharandter Wald gut zu erkennen. Nordöstlich davon liegt das Stadtgebiet von Dresden. Im Simulationsgebiet überwiegen landwirtschaftlich genutzte Flächen. Abbildung 6.10 (unten) zeigt die Jahressummen der NPP und der NEP für das Simulationsgebiet. Die Waldgebiete wie der Tha-

randter Wald im Zentrum des Bildes sind durch die hohen Werte von NPP und NEP gut auszumachen. Die Werte der NPP und NEP für die in diesem Testgebiet vorhandenen Grasland-Pixel sind im Gegensatz zu den Simulationen für Deutschland deutlich geringer als die Werte der Waldgebiete. Ursache hierfür ist, dass die Werte des LAI für Grasland-Pixel bei dem neuen Verfahren deutlich geringer eingeschätzt werden als mit den ursprünglich verwendeten Zeitreihen in 16 km Auflösung. Da die neuen Datensätze jedoch noch nicht validiert sind und nur wenige Pixel im Testgebiet um Tharandt als Grasland klassifiziert sind, ist dieses Ergebnis noch nicht auf ganz Deutschland übertragbar. Es kann aber als Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Simulation der Graslandgebiete mit den neuen LAI-Zeitreihen realistischere Werte der NEP liefert. Landwirtschaftlich genutzte Flächen weisen meist negative Werte der NEP auf, sind also Quellen für CO₂. Dagegen sind die Werte der Waldgebiete deutlich positiv, sie stellen Senken für atmosphärisches CO₂ dar. Der Grund hierfür lässt sich ausmachen, wenn die Zeitreihen von LAI und NPP, bzw. NEP für unterschiedliche Klassen der Landnutzung betrachtet werden. Bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die teilweise kurze Wachstumsphase in den LAI-Zeitreihen gut zu erkennen. Die Zeitreihen von NPP und NEP zeigen qualitativ den gleichen Verlauf. Dadurch überwiegt bei diesen Gebieten insgesamt die Bodenrespiration. Dagegen weisen die Waldgebiete höhere Werte des LAI auf (Abb. 6.8). In den Wintermonaten ergibt sich jedoch für die Nadelwaldgebiete eine unrealistische Unterschätzung des LAI, was im Vergleich zu den Stationswerten der NEP zu einer deutlichen Unterschätzung durch das Modell führt (Abbildung 6.9). Die Jahressumme der NEP beträgt 361 gC/m²/Jahr im Gegensatz zu gemessenen 615 gC/m²/Jahr.

6.3 Fehlerbetrachtung

Für die in diesem Kapitel vorgestellten regionalen CO₂-Bilanzen soll zum Abschluss der zu erwartende Fehler der Simulationen geschätzt werden. Hierzu werden die Ergebnisse der in Kapitel 5 vorgestellten Evaluierungssimulationen verwendet. Abbildung 6.11 soll das Vorgehen verdeutlichen. Die Tageswerte aller Evaluierungssimulationen wurden gegen die Stationswerte aufgetragen und die Stationsachse in diskrete NEP-Klassen mit einer Breite von 0,1 gC/m²/Tag eingeteilt. Für jede Klasse i der Stationswerte können nun Mittelwert und Standardabweichung s_i der Simulationswerte berechnet werden, sofern genügend Simulationswerte in der Klasse vorhanden sind. Als minimale Anzahl an Werten, für die eine Auswertung erfolgte, war $n=25$ angenommen. Die Klassenbreite wurde so gewählt, dass die Zahl der Simu-

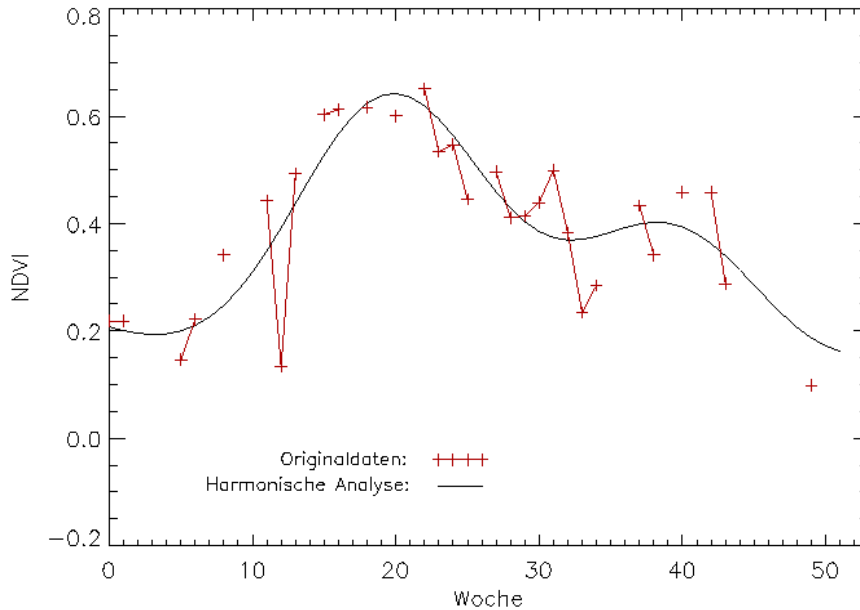


Abbildung 6.7: Die Zeitreihen des NDVI vor und nach der harmonischen Analyse für ein Pixel mit landwirtschaftlicher Nutzung.

lationswerte in den meisten Klassen groß genug ist, die Klassenbreite für die meisten Fälle aber unterhalb einer angenommenen Messgenauigkeit der Stationswerte von $\pm 20\%$ bleibt (Grünwald, 2003). Aus der Standardabweichung s_i kann für jede Klasse i der Fehler f_i des Mittelwertes geschätzt werden:

$$f_i = s / \sqrt{n_i} \quad (6.1)$$

mit der Anzahl der Tageswerte n_i innerhalb der Klasse. Der gesamte Fehler des Modells $dNEP_{Modell}$ wird als Mittelwert über die Fehler aller Klassen N_i geschätzt:

$$dNEP_{Modell} = \frac{\sum_{i=1}^{N_I} f_i}{N_i} \quad (6.2)$$

Dieser beträgt 28,5%. Um die Auswirkung der Messfehler in den Stationen zu berücksichtigen, kann der gesamte Fehler dNEP aus dem Fehlerquadrat der Messungen und dem Fehlerquadrat des Modells berechnet werden:

$$dNEP = \sqrt{dNEP_{Station}^2 + dNEP_{Modell}^2} \quad (6.3)$$

Bei Grünwald (2003) ist für den Fehler der NEP-Jahreswerte ein Wert von $\pm 15\%$ angegeben. Damit beträgt der gesamte Fehler in den simulierten Jahreswerten $dNEP = \sqrt{0,285^2 + 0,15^2} = 0,322$ oder $\pm 32,2\%$.

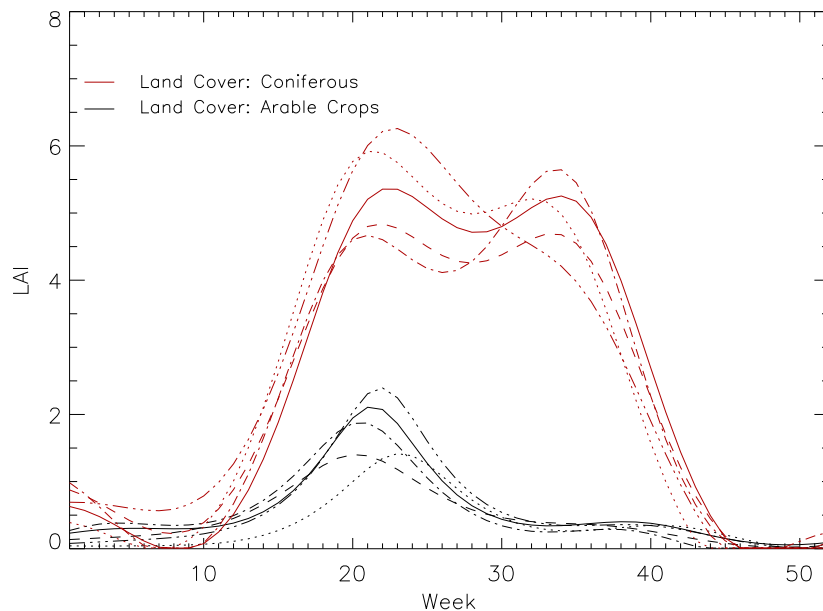


Abbildung 6.8: Zeitreihen des LAI für mehrere Pixel gleicher Landnutzungs-klassen. Schwarz: Nadelwald. Rot: Ackerland.

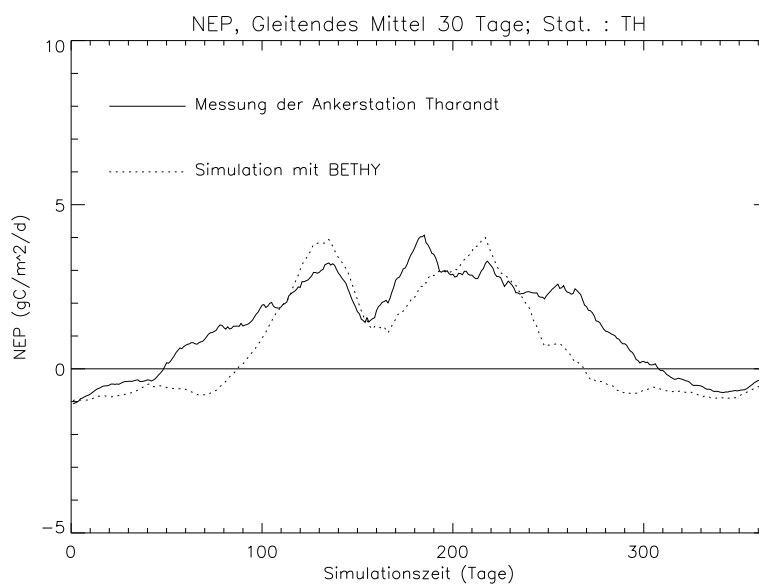


Abbildung 6.9: Vergleich zwischen den Zeitreihen der modellierten NEP und der gemessenen NEP als gleitendes Mittel über 30 Tage für die Ankerstation Thorandt.

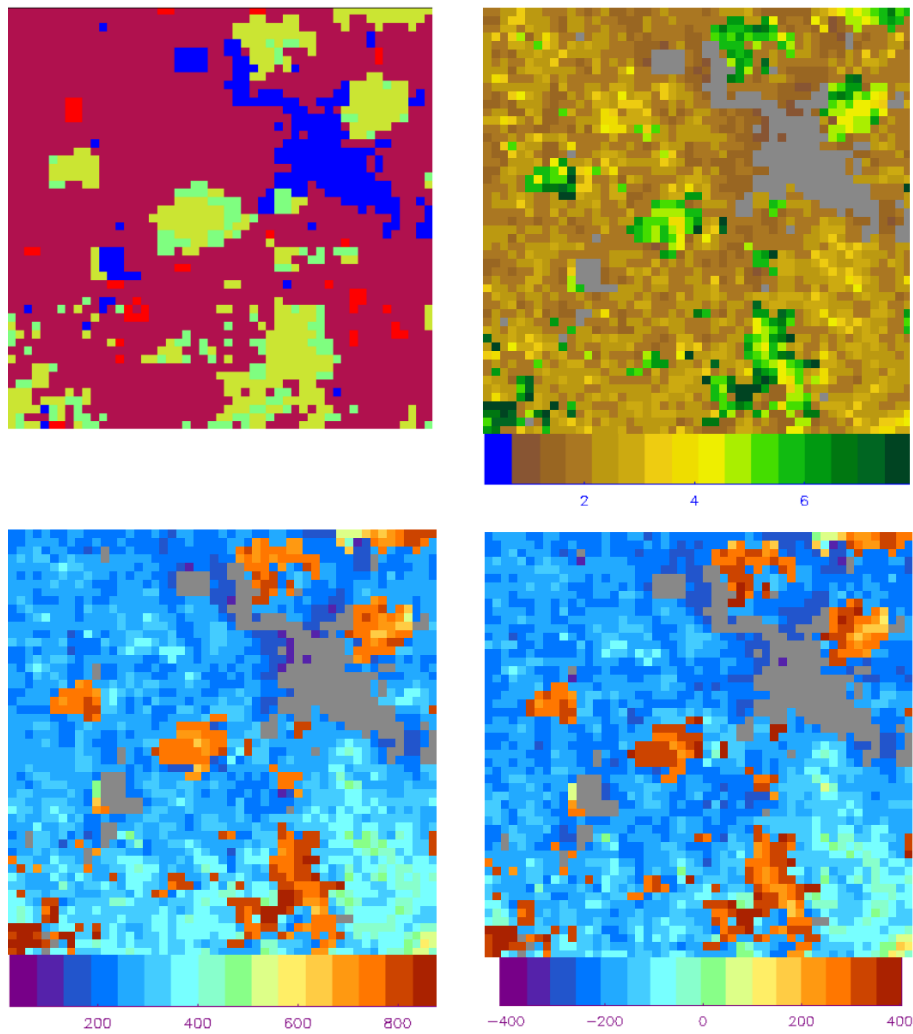


Abbildung 6.10: Simulation für das Gebiet um den Tharandter Wald bei Dresden, 1998. Links oben: Landnutzung, Gelb Nadelwald, Grün Mischwald, Rot Grasland, Dunkelrot Ackerland, Blau: Bebautes Gebiet. Rechts oben: Verteilung des LAI für die 25. Kalenderwoche. Links unten: Verteilung der Jahressumme der NPP in gC/m²/Jahr, Rechts unten: Verteilung der Jahressumme der NEP in gC/m²/Jahr.

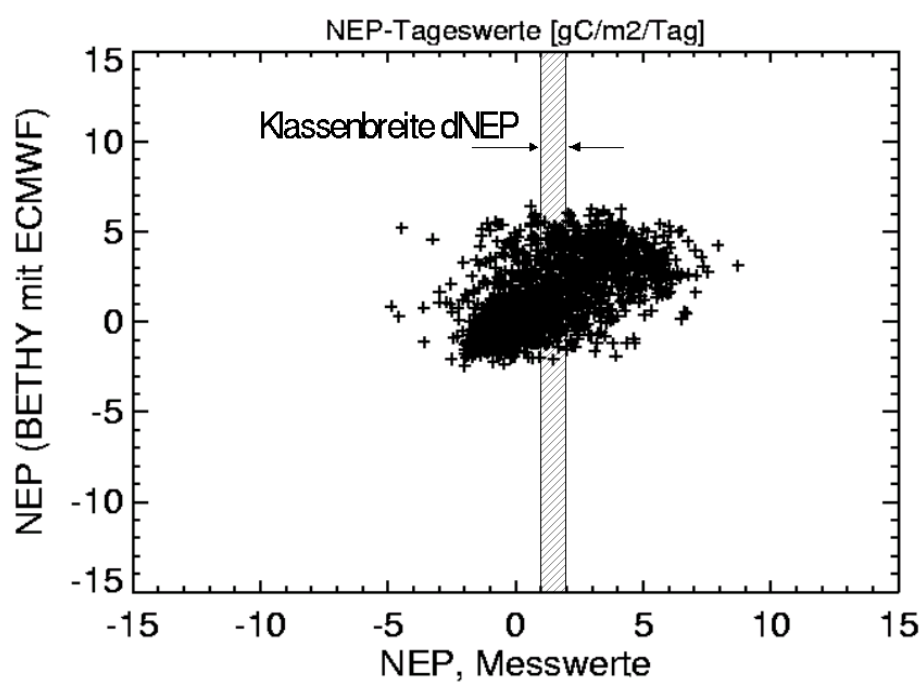


Abbildung 6.11: Beispiel für die Klasseneinteilung der Simulationsergebnisse, hier dargestellt am Beispiel einer Klassenbreite von $1 \text{ gC}(\text{m}^2/\text{Tag})$.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit soll als Vorarbeit zu einer künftigen operationellen Modellierung der CO₂-Bilanz für Europa verstanden werden. Mit diesem Hintergrund wurde das Modell BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Model) für diese Arbeit und die künftige operationelle Anwendung als Kompromiss zwischen physikalischer Komplexität und zu erwartendem Simulationsaufwand gewählt. Vor den eigentlichen Simulationen wurden Sensitivitätstests durchgeführt, die das Ziel hatten, die Auswirkungen der Randbedingungen und kritischer Antriebsgrößen des Modells zu testen. Die größten Einflüsse zeigten sich bei der Variation von Blattflächenindex, atmosphärischem CO₂-Gehalt und der Gewichtung von primärer und sekundärer Vegetation. Zusätzlich wurde untersucht, wie groß die Auswirkungen der Parametrisierungen für die Tagesgänge von Temperatur und PAR im Vergleich zur Verwendung realer Tagesgänge sind und wie sich der Zeitschritt der meteorologischen Antriebsdaten bei der Berechnung der Tageswerte auswirkt (Datensampling). Für die Variation des Zeitschrittes der Ursprungsdaten ergaben sich kaum Abweichungen in den Tagessummen der PAR. Ebenso ist die Sensitivität der modellierten NPP in Bezug auf das Datensampling minimal. Im Vergleich zum Referenzlauf mit direktem Antrieb führte die Parametrisierung der Tagesgänge zu einer Überschätzung der NPP zwischen 8,4% für einen Zeitschritt der Ursprungsdaten von 180 Minuten und 9,4% für einen zugrundeliegenden Zeitschritt von 15 Minuten.

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse wurde eine Evaluierung des Modells mit Stationsdaten des CARBOEUROPE-Netzwerkes durchgeführt. Verwendete Stationen waren Tharandt (Deutschland), Loobos (Niederlande), Vielsalm (Belgien), Aberfeldy (Schottland) und Hyytiala (Finnland). Hierzu war es notwendig, nicht nur die Simulationsergebnisse mit den Messungen zu vergleichen, sondern auch die Qualität der verwendeten Antriebsdaten zu untersuchen. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur

Bestimmung der PAR aus Bewölkungsanalysen des ECMWF zeigt eine systematische Überschätzung der PAR aber eine relativ geringe Streuung der Tageswerte. Dagegen weichen die Tageswerte der Globalstrahlung aus den ERA40-Reanalysen stärker von den Messwerten ab. Die Korrelation zwischen den Messwerten und den Werten aus den Reanalysen ist hier auch geringer. Die Tageswerte der Temperatur zeigen eine gute Korrelation mit den Werten der Messstationen.

Die simulierten Tageswerte der NEP zeigen im Referenzlauf eine systematische Überschätzung der Jahreswerte. Bei Simulationen mit den Flächendaten als Input ergibt sich ebenfalls eine Überschätzung unter Verwendung der aus den Analysen der Bewölkung abgeleiteten PAR aber eine Unterschätzung bei Verwendung der Globalstrahlung aus den Reanalysen. Die Zeitreihen des LAI und die Landnutzung nach PELCOM haben beim Vergleich mit den Stationsdaten deutliche Schwachpunkte in der Zuweisung der korrekten LAI-Werte, bzw. Landnutzungsklassen offenbart. Fehlklassifikationen der Landnutzung und Überschätzungen des LAI führten im Fall der Station Loobos zu einer rund vierfachen Überschätzung der NEP. Für den LAI werden künftig Zeitreihen aus Satellitendaten des NOAA-AVHRR in 1 km Auflösung zur Verfügung stehen, die in dieser Arbeit einem ersten qualitativen Test unterzogen wurden (s.u.), für künftige Anwendungen jedoch zuerst noch validiert werden müssen. Für eine gesamteuropäische Abdeckung der Landnutzung in 1 km Auflösung gibt es mit der MODIS Klassifikation (Townshend, 1999) erst seit kurzem eine Alternative, die allerdings für den hier behandelten Zeitraum nicht zur Verfügung steht. Generell ist zu empfehlen, die Genauigkeit jeder verwendeten Klassifikation und ihre Auswirkungen auf die Modellergebnisse detailliert zu untersuchen und zu dokumentieren.

Mit dem Hintergrundwissen der bei der Evaluierung gefundenen systematischen Abweichungen des Modells und der Antriebsdaten konnte nun eine erste Bilanz des regionalen Austausches von CO_2 mit dem Modellsystem simuliert werden. Als Gebiet wurde Deutschland gewählt. Dabei ergab sich eine NEP der Waldgebiete Deutschlands von 72,17 TgC/Jahr für das Jahr 1998. Absolut gesehen ist die Assimilation durch Nadelwälder mit 29,13 TgC/Jahr am größten, gefolgt von Grasland mit 24,37 TgC/Jahr. Grasland nimmt jedoch eine geringere Gesamtfläche ein. Bezogen auf die Durchschnittswerte weist Grasland mit 797,89 gC/m²/Jahr die höchsten Assimilationsraten auf. Da jedoch der LAI der betreffenden Gebiete durchgehend sehr hoch liegt, ist eine Überschätzung der NEP für diese Landbedeckungsklasse nicht auszuschließen. Messungen der NEP für diese Gebiete liegen nicht vor, so dass an dieser Stelle keine endgültige Aussage hierzu getroffen werden kann. Das macht deutlich, dass in Zukunft Graslandgebiete und andere Vegetationsklassen, die außerhalb der Waldgebiete liegen, stärker in den Auswertungen

und Messungen berücksichtigt werden müssen. Bisher sind die Standorte der Messstationen zur CO₂ Bilanzierung im wesentlichen auf Wälder beschränkt. Eine qualitative Verbesserung der Ergebnisse konnte durch die Verwendung zeitlich und räumlich höher aufgelöster Zeitreihen des Vegetationsindex LAI erreicht werden. Vor allem die räumliche Differenzierung von Quellen und Senken von CO₂ war wesentlich besser als bei den ursprünglich verwendeten Datensätzen mit 16 km Auflösung. Dort waren Unterschiede hauptsächlich durch die Landbedeckung bedingt.

Für eine weitere operationelle Nutzung des Modells mit dem Schwerpunkt Europa wird die Auflösung von 1 km zu aufwendig, was Simulationszeit und -ressourcen betrifft. Da jedoch auf die Nutzung räumlich hoch aufgelöster Daten nicht verzichtet werden soll, bietet sich eine Aggregation der Daten auf ein groberes Modellgitter an (z.B. auf das 0.5°-Gitter des ECMWF). Dazu wird ein mittlerer LAI für jede im Pixel vorhandene Landnutzungs-kategorie gebildet. Der meteorologische Antrieb erfolgt als Mittelwert auf dem Gitter. Vorher muss getestet werden, wie groß die daraus resultierenden Abweichungen im Vergleich zu hochaufgelösten Simulationen sind und welche Gitterauflösung für dieses Verfahren optimal ist.

In der für diese Arbeit verwendeten Modellversion gibt es noch keine explizite Berechnung des Bodenwärmeflusses und daher auch keine Kopplung von Bodenwasser- und -wärmehaushalt. Da die heterotrophe Respiration sowohl von der Bodentemperatur als auch von der Bodenfeuchte abhängt, sollte für künftige Simulationen ein Bodenmodell verwendet werden, dass diese Kriterien erfüllt.

Im Gegensatz zum Originalmodell wurde in dieser Arbeit auf eine Berechnung der Phänologie durch BETHY verzichtet. Der LAI wurde als externe Antriebsgröße für das Modell verwendet. Wie in der Evaluierung gezeigt wurde, ist dies ein Schwachpunkt, da Fehler in den Antriebsdaten sich direkt auf die Modellergebnisse auswirken. Bei Verwendung einer modellierten Phänologie kann eine massive Über- oder Unterschätzung zumindest eingeschränkt werden, da hier Informationen über die Rahmenbedingungen der phänologischen Entwicklung einfließen. Die Verwendung einer modellierten Phänologie erlaubt zudem die Anwendungen von Techniken der Datenassimilation und damit eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse. Hierzu können aus Satellitendaten abgeleitete Vegetationsparameter wie LAI oder fapar Verwendung finden.

Eine weitere Verbesserung ist die Verwendung von Stationsdaten des atmosphärischen CO₂-Gehaltes, der bisher als Randbedingung fest vorgegeben wurde. Da nach dem Sensitivitätstest aus Kapitel 4 eine starke Auswirkung auf die Modellergebnisse zu erwarten ist, sollte die Verwendung von Feldern

des CO₂-Gehaltes angestrebt werden.

Literaturverzeichnis

Arya, S.P., 1985: Introduction to micrometeorology. *International Geophysical Series, Vol. 42, Academic Press Inc., London, 307 Seiten, ISBN 0-12-064490-8*

Anderson, M.C., Norman, J.M., Meyers, T.P., Diak, G.R., 2000: An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 101, 265-289*

Bach, H., Mauser, W., 2003: Methods and examples for remote sensing data assimilation in land surface process modelling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 7, 1629-1637*

Bittner, M., Offermann, D., Bugaeva, V., Kokin, G.A., Koshelkov, J.P., Krivolutsky, A., Tarasenko, D.A., Gil-Ojeda, M., Hauchecorne, A., Lübken, F.-J., De La Morena, B.A., Mourier, A., Nakane, H., Oyama, K.I., Schmidlin, F.J., Soule, I., Thomas, L., Tsuda, T., 1994: Long Period/large scale oscillations of temperature during the DYANA campaign. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 56, 1675-1700*

Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the atmosphere. *Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, 299 Seiten, ISBN 90-277-1247-6*

Chen, J.M., Liu, J., Goulden, M.L., 1999: Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling, Vol. 124, 99-119*

Collatz, G.J., Ribas-Carbo, M., Berry, J.A., 1992: Cou-

pled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, Vol. 19, 519-538

Dickinson, R.E., 1984: Modeling evapotranspiration for three dimensionale global climate models. In: Hanson, J.E., Takahashi, T. (Eds.): Climate processes and climate sensitivity. *American Geophysical Union, Geophys. Monogr.* 29, 58-72

Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980: A biochemical model of photosynthesis in leaves of C₃ species. *Planta*, Vol. 149, 78-90

Federer, C.A., 1979: A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resources Research*, Vol. 15, 555-562

Freibauer, A. (Ed.), 2001: CarboEurope - A cluster of projects to understand and quantify the carbon balance of Europe (Flyer). *CarboEurope European Office, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena*

Garrat, J.R., 1992: The atmospheric boundary layer. *Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-38052-9*

Goetz, S.J., Prince, S.D., Goward, S.N., Thawley, M.M., Small, J., 1999: Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency model approach. *Ecological Modelling*, Vol. 122, 239-255

Grünwald, T., 2003: Langfristige Beobachtung von Kohlendioxidflüssen mittels Eddy-Kovarianz-Technik über einem Altlichtenbestand im Tharandter Wald. *Tharandter Klimaprotokolle, Band 7, ISBN 3-86005-314-0, Eigenverlag der Technischen Universität Dresden.*

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. *Cambridge University Press, 881 Seiten, ISBN 0521-80767-0*

Janssens, I.A. et al., 2003: Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of european anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, Vol.

300, 1538-1541

Kaminski, T., Heimann, M., Giering, R., 1999: A coarse grid three-dimensional global inverse model of the atmospheric transport 2. Inversion of the transport of CO₂ in the 1980s. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, Vol. 104 (D15), 18555-18582

Knorr, W., 1997: Satellitengestützte Fernerkundung und Modellierung des globalen CO₂-Austauschs der Landvegetation: Eine Synthese. *Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg*. ISSN 0938-5177

Knorr, W., Lakshmi, V., 2001: Assimilation of fAPAR and Surface Temperature Into a Land Surface and Vegetation Model. In: Lakshmi, V., Albertson, J., Schaake, J. (Eds.): Land Surface Hydrology, Meteorology and Climate: Observations and Modeling. *Water Science and Application Volume 3*, American Geophysical Union, Washington D.C., USA, pp. 177-200

Y. Knyazikhin, J. Glassy, J. L. Privette, Y. Tian, A. Lotsch, Y. Zhang, Y. Wang, J. T. Morisette, P. Votava, R.B. Myneni, R. R. Nemani, S. W. Running, 1999: MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document, <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>

Leahy, P., Kiely, G., Scanlon, T.M., 2004: Managed grasslands: A greenhouse gas sink or source? *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L20507, Nr. 20

Meisner, R., Bittner, M., Dech, S., 1999: Computer animation of remote sensing-based time series data sets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 2, 1100-1106

Monteith, J.L., 1965: Evaporation and environment. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234

Monteith J.L. (Ed.), 1975: Vegetation and the atmosphere. Volume 1: Principles. *Academic Press, London, New York, San Francisco*, 278 Seiten, ISBN 0-12-505101-8

Monteith, J.L. (Ed.), 1976: Vegetation and the atmosphere. Volume 2: Case studies. *Academic Press, London, New York, San Francisco*, 439 Seiten, ISBN 0-12-505102-6

Monteith, J.L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series B*, 281, 277-294

Mücher, C.A., Steinnocher, K., Champeaux, J.L., Griguolo, S., Wester, K., Loudjani, P., 1998: Land Cover Characterization for environmental monitoring of pan-Europe. In: Proc. 18th EARSEL Symp. on Operational Remote Sensing for Sustainable development, ITC, Enschede, 11-13th May 1998, pp 107-113.

Mücher, C.A., Steinnocher, K., Kressler, F., Heunks, C., 2000: Land cover characterization and change detection for environmental monitoring of pan-Europe. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, Nr. 6-7, 1159-1181

Myneni, R. B., Nemani, R. R. and Running, S.W., 1997: Algorithm for the estimation of global land cover, LAI and FPAR based on radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, 1380-1393

NASA, 2000: Global Land Vegetation - An Electronic Textbook. In: NASA. Studying Earth's Environment From Space. June 2000. (2004) NASA, <http://www.ccpo.odu.edu/SEES/index.html>

Nabuurs, G.J., Päivinen, R., Sikkema, R. Mohren, G.M.J., 1997: The role of european forests in the global carbon cycle - a review. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13, No. 6, 345-358

Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., Running, S. W., 2003: Climate-driven increases in global terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, Vol. 300, 6 June 2003, 1560-1563

Newcomer, J., Landis, D., Conrad, S., Curd, S., Huemmerich, K., Knapp, D., Morrell, A., Nickeson, J., Papagno, A., Rinker, D., Strub, R., Twine, T., Hall, F., Sellers, P. (Eds.)

2000: Collected data of the boreal ecosystem-atmosphere study. NASA, CD-ROM, 2000

Paliouras, E., Günther, K.P., Maier, S.W., Tungalagsaikhan, P., Fistic, S., Wißkirchen, K., Holzer-Popp, T., 2003: Monitoring of biogenic emissions using remote sensing. In: Brebbia, C.A., Patania, F. (Eds.): Air Pollution XI. Eleventh International Conference on modelling, monitoring and management of air pollution. WIT Press, Southampton, UK, ISBN 1-85312-982-8

Peng, S., 2000: From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, Vol. 135, 33-54

Peters, R., Queck, R., Bernhofer, C., 2003: Modellierung der Transpiration auf Basis mikrometeorologischer Verdunstungsmessungen. In: Bernhofer, C. (Ed.): Flussbestimmung an komplexen Standorten. *Tharandter Klimaprotokolle, Band 8*, ISBN 3-86005-356-6, Eigenverlag der Technischen Universität Dresden.

Potter, C., Klooster, S., Myneni, R., Genovese, V., Tan, P.N., Kumar, V., 2003: Continental-scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling 1982-1998. *Global and Planetary Change*, Vol. 39, 201-213

Preußner, C., 1998: Ermittlung des Blattflächenindex aus AVHRR-NDVI-Zeitreihen. *Diplomarbeit im Fach Geographie, Katholische Universität Eichstätt, Mathematisch-Geographische Fakultät, angefertigt am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)*.

Ritchie, J.T., 1972: Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, Vol. 8, 1204-1213

Running, S.W., Nemani, R., Glassy, J.M., Thornton, P.E., 1999: MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 3.0*, 29. April, 1999, <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/algorithms.html>

Scheffer F., 2002: Lehrbuch der Bodenkunde / Schef-

fer/Schachtschabel. 15. Auflage, neubearbeitet und erweitert von Blume, H.P.. *Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg*. ISBN 3-8274-1324-9

Scurlock, J.M.O., Asner, G.P., Gower, S.T., 2001: Worldwide Historical Estimates and Bibliography of Leaf Area Index, 1932-2000. *ORNL Technical Memorandum TM-2001/268, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.*

Sellers, P.J., 1985: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing, Vol. 6, 1335-1372*

Sellers, P.J. et al., 1996: A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCM's. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate, Vol. 9, 706-737*

Sitch, S., Smith, B., Prentice, C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplans, J.O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M.T., Thonicke, K., Venevsky, S., 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology, Vol. 9, 161-185*

Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H., Schimper, A.F.W., 1978: Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. *Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, ISBN 3-437-20140-9*

Stull, R.B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 666 Seiten, ISBN 90-277-2768-6*

Tate, K.R., Scott, N.A., Parshotam, A., Brown, L., Wilde, R.H., Giltrap, D.J., Trustrum, N.A., Gomez, B., Ross, D.J., 2000: A multi-scale analysis of a terrestrial carbon budget. Is New Zealand a source or a sink of carbon? *Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 82, 229-246*

Valentini, R. (Ed.), 2000: The Euroflux dataset 2000. In: Carbon, water and energy exchanges of European forests. *Springer Verlag, Heidelberg pp 300.*

Veroustrate, F., Sabbe, H., Eerens, H., 2002: Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, 376-399

Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J. (Eds.), 2000: Land use, land-use change and forestry. A special report of the IPCC. *Cambridge University Press*, 377 Seiten, ISBN 0-521-80083-8

Zhan, X., DeFries, R., Hansen, M., Townshend, T., DiMiceli, C., Sohlberg, R., Huang, C., 1999: MODIS Enhanced Land Cover and Land Cover Change Product Algorithm Theoretical Basis Documents (MOD29). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*, Version 2.0, 30. April, 1999, <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/algorithms.html>

Zahn, X., Kustas, W.P., 2001: A coupled model of land surface CO₂ and energy fluxes using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 107, 131-152

Anhang A

Tabellen

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	676,27	570,72	849,04
TH	1998	556,84	625,28	614,84	713,58
TH	1999	690,71	704,57	698,35	696,73
TH	2000	653,71	863,26	648,49	864,13
VI	1998	395,42	387,02	507,93	465,56
LO	1998	257,58	297,72	289,05	313,00
LO	1999	147,47	199,09	229,70	298,44
LO	2000	296,59	340,43	344,32	297,42
HY	1998	298,88	277,38	295,82	270,32
HY	1999	152,47	325,17	184,72	426,27
HY	2000	175,20	266,25	174,99	268,07
AB	1998	510,97	582,83	543,54	612,06

Tabelle A.1: KONTROLLLAUF: Jahreswerte der NEP für die verwendeten CARBOEUROPE-Stationen und den Kontrolllauf. In den beiden linken Tabellenspalten stehen die Pseudo-Jahreswerte, in den beiden rechten Spalten sind dagegen die vollständigen Messreihen verwendet worden.

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	729,80	570,72	918,08
TH	1998	556,84	678,60	614,84	781,62
TH	1999	690,71	787,72	698,35	788,19
TH	2000	653,71	760,56	648,49	744,07
VI	1998	395,42	625,80	507,93	775,87
LO	1998	257,58	867,78	289,05	1026,10
LO	1999	147,47	694,87	229,70	1080,52
LO	2000	296,59	1052,53	344,32	1103,37
HY	1998	298,88	495,36	295,82	486,25
HY	1999	152,47	577,56	184,72	730,09
HY	2000	175,20	630,08	174,99	633,65
AB	1998	510,97	356,70	543,54	376,30

Tabelle A.2: Test FLÄCHE: Jahreswerte der NEP für die verwendeten CARBOEUROPE-Stationen und die Simulationen mit dem Modellantrieb aus den Flächendaten. Links: Pseudojahreswerte. Rechts: Jahreswerte aus den vollständigen Zeitreihen.

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	729,80	570,72	918,08
TH	1998	556,84	678,60	614,84	781,62
TH	1999	690,71	787,72	698,35	788,19
TH	2000	653,71	760,56	648,49	744,07
VI	1998	395,42	527,16	507,93	661,73
LO	1998	257,58	619,48	289,05	710,66
LO	1999	147,47	466,52	229,70	712,45
LO	2000	296,59	778,02	344,32	789,92
HY	1998	298,88	252,55	295,82	241,84
HY	1999	152,47	329,23	184,72	433,84
HY	2000	175,20	394,91	174,99	396,54
AB	1998	510,97	356,70	543,54	376,30

Tabelle A.3: Test LAI: Pseudojahreswerte und Jahreswerte der NEP für den Test mit dem durch die Stationswerte limitierten LAI.

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	729,80	570,72	918,08
TH	1998	556,84	678,60	614,84	781,62
TH	1999	690,71	787,72	698,35	788,19
TH	2000	653,71	760,56	648,49	744,07
VI	1998	395,42	532,05	507,93	671,97
LO	1998	257,58	395,27	289,05	421,04
LO	1999	147,47	267,50	229,70	403,08
LO	2000	296,59	515,30	344,32	487,46
HY	1998	298,88	252,55	295,82	241,84
HY	1999	152,47	329,23	184,72	433,84
HY	2000	175,20	394,91	174,99	396,54
AB	1998	510,97	464,27	543,54	493,01

Tabelle A.4: Test LAI+LCC: Pseudojahreswerte und Jahreswerte der NEP für den Test mit dem durch Stationswerte limitierten LAI durch Stationswerte korrigierter Landbedeckung.

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	652,20	570,72	831,92
TH	1998	556,84	581,87	614,84	681,21
TH	1999	690,71	663,53	698,35	653,57
TH	2000	653,71	711,19	648,49	696,63
VI	1998	395,42	378,79	507,93	466,80
LO	1998	257,58	328,47	289,05	333,51
LO	1999	147,47	230,27	229,70	341,73
LO	2000	296,59	443,50	344,32	433,04
HY	1998	298,88	211,25	295,82	200,36
HY	1999	152,47	285,85	184,72	386,61
HY	2000	175,20	328,20	174,99	329,65
AB	1998	510,97	388,91	543,54	408,08

Tabelle A.5: Test LAI+LCC+PAR: Pseudojahreswerte und Jahreswerte der NEP für den Test mit limitiertem LAI, korrigierter Landbedeckung und durch Stationswerte ersetzter PAR.

JAHRESWERTE DER NEP IN $gC/m^2/Jahr$					
		Reduziert	Reduziert	Voll	Voll
Station	Jahr	Messung	BETHY	Messung	BETHY
TH	1997	471,14	317,92	570,72	425,80
TH	1998	556,84	320,70	614,84	374,64
TH	1999	690,71	405,03	698,35	385,48
TH	2000	653,71	437,95	648,49	421,65
VI	1998	395,42	256,94	507,93	325,02
LO	1998	257,58	172,99	289,05	160,57
LO	1999	147,47	117,99	229,70	192,44
LO	2000	296,59	281,91	344,32	244,32
HY	1998	298,88	90,16	295,82	79,28
HY	1999	152,47	104,47	184,72	168,04
HY	2000	175,20	163,88	174,99	164,20
AB	1998	510,97	256,19	543,54	264,74

Tabelle A.6: Test LAI+LCC+GLOB: Pseudojahreswerte und Jahreswerte der NEP für den Test mit limitiertem LAI, korrigierter Landbedeckung und der Globalstrahlung aus ERA40-Reanalysen des ECMWF.

Anhang B

Variablenliste

$a(z)$: Blattflächendichte im Höhenlevel z
 a_s : Bodenalbedo
 a_v : Vegetationsalbedo
 c_p : Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
 d : Verdrängungshöhe
 e_a : Dampfdruck Atmosphäre
 e_s : Sättigungsdampfdruck
 f : Empirische Parametrisierung der Photosynthese im Ansatz nach Dickinson (1984)
 f_{apar} : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
 f_e : Verhältnis aus aktueller und potentieller Evapotranspiration
 f_i : Fehler des Mittelwertes einer Klasse
 $f_{r,leaf}$: Stickstoffanteil der Blätter an der gesamten Pflanze
 $f_{R,G}$: Faktor zur Bestimmung der Wachstumsatmung als Anteil der NPP
 h_{ECMWF} : Elevation des ECMWF-Modells
 h_{ETOP} : Elevation des digitalen Geländemodells ETOP
 p : Luftdruck
 r : Flusswiderstand
 r_a : Aerodynamischer Widerstand zwischen Vegetation und Atmosphäre
 r_c : Bestandswiderstand (Canopy Resistance)
 r_{par} : Ratio aus aktueller PAR (s.u.) und PAR bei unbedecktem Himmel
 r_s : Stomatawiderstand
 r_{smax} : Maximaler Stomatawiderstand
 r_{smin} : Minimaler Stomatawiderstand
 s : Steigung der Dampfspannungskurve
 s_i : Standardabweichung
 $t_{l,v}$: Langwellige Transmissivität der Vegetation
 u : Windgeschwindigkeit

u^* : Schubspannungsgeschwindigkeit
 v_h : Vegetationshöhe
 z_0 : Rauigkeitslänge

A_C : Photosyntheserate auf Bestandsebene
 A_S : Photosyntheserate auf Blattebene
 C_a : CO₂-Konzentration in der Atmosphäre
 C_i : Blattinterne CO₂-Konzentration
 $C_{i,0}$: Blattinterne CO₂-Konzentration ohne Wasserlimitierung
 E_0 : Turbulente Flussdichte latenter Wärme
 E_{PAR} : Energiegehalt eines PAR-Quants
 E_S : Evaporation
 E_T : Transpiration
 E_V : Evapotranspiration
 E_{akt} : Aktuelle Evapotranspiration
 E_{pot} : Potentielle Evapotranspiration
 F : Flussdichte
 $F_{i=[1,4]}$: Empirische Faktoren zur Bestimmung des Stomatawiderstandes
GPP: Bruttoprimärproduktion (Gross Primary Production)
 G : Bodenwärmefluss
 G_a : Aerodynamische Leitfähigkeit
 G_c : Bestandsleitfähigkeit
 H_0 : Turbulente Flussdichte fühlbarer Wärme
 I_{PAR} : PAR-Absorptionsrate im Bestand
 J : Elektronentransportrate
 J_C : Rubisco-limitierte Photosyntheserate aus dem Ansatz nach Farquhar (1980)
 J_E : Elektronentransport-limitierte Photosyntheserate aus dem Ansatz nach Farquhar (1980)
 J_c : Rubisco-limitierte Photosyntheserate aus dem Ansatz nach Collatz (1992)
 J_e : Kombinierte Elektronentransport- und Rubisco-limitierte Photosyntheserate im Ansatz nach Collatz (1992)
 J_i : Elektronentransport-limitierte Photosyntheserate aus dem Ansatz nach Collatz (1992)
 K : Turbulenter Diffusionskoeffizient
 K_C : Michaelis-Menten-Konstante für CO₂
 K_O : Michaelis-Menten-Konstante für O₂
LAI: Leaf Area Index (Blattflächenindex)
LCC: Landbedeckungsklasse (Land Cover Classification)
LUE: Light Use Efficiency (Lichtnutzungseffizienz) aus dem Ansatz nach

Monteith (1972)

M_C : Molekulargewicht von Kohlenstoff

NDVI: Normalized Differences Vegetation Index

NEP: Nettoökosystem-Produktion (Net Ecosystem Production)

NPP: Nettoprimärproduktion (Net Primary Production)

O_x : O_2 -Partialdruck

PAR: Photosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetically Active Radiation)

PAR_{akt} : Aktuelle PAR

PAR_{pot} : Potentielle PAR bei unbedecktem Himmel

P_S : Direkter Niederschlagseintrag in den Boden

P_V : Interzeption

Q_{10} : Steigerung der heterotrophen Respiration bei einem Temperaturanstieg von $10^\circ C$

R: Allgemeine Gaskonstante

R_0 : Strahlungsbilanz

$R_{0,s}$: Strahlungsbilanz am Boden

$R_{0,v}$: Strahlungsbilanz der Vegetation

R_G : Globalstrahlung

R_{Gr} : Empirischer Quotient zur Parametrisierung der Photosynthese im Ansatz nach Dickinson (1984)

R_D : Dunkelatmung (Dark Leaf Respiration)

R_G : Wachstumsatmung (Growth Respiration)

$R_{L\downarrow}$: Abwärts gerichteter Anteil der langwelligen Strahlung

$R_{L\uparrow}$: Aufwärts gerichteter Anteil der langwelligen Strahlung

R_M : Erhaltungsatmung (Maintenance Respiration) R_S : Strahlungsbilanz am Boden

R_a : Autotrophe Respiration

R_h : Heterotrophe Respiration

S: Supply Rate, maximale Rate der Wasserversorgung durch Wurzeln

S_k : Solarkonstante

S_m : Schmelzwassereintrag in den Boden

T: Mit der Elevation skalierte Temperatur

T_k : Lufttemperatur in [K]

T_{max} : Maximum des Tagesgangs der Temperatur

T_{min} : Minimum des Tagesgangs der Temperatur

T_{mit} : Tagesmittel der Temperatur

T_r : Transmissionskoeffizient

V_m : Rubisco-Kapazitätsmaximum

W_S : Bodenwassergehalt

α : Effizienz der Lichtausnutzung
 δ_s : Aktueller Inklinationswinkel
 γ : Psychrometerkonstante
 ρ : Dichte von Luft
 ρ_{nir} : Reflektanz im nahinfraroten Spektralbereich
 ρ_{red} : Reflektanz im roten Spektralbereich
 ϕ : Geographische Breite
 ϕ_r : Geographische Breite der Wendekreise
 ψ : Eigenschaft
 σ_{cl} : Anteil tiefer Bewölkung
 σ_{cm} : Anteil mittelhoher Bewölkung
 σ_{ch} : Anteil hoher Bewölkung
 θ_s : Kurvenparameter für J_e

Γ : Feuchtadiabatischer Temperaturgradient
 Γ_* : CO₂-Kompensationspunkt
 Λ : Geographische Länge
 Φ : Oberflächenabfluss (Runoff)

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle allen, die zum Gelingen meiner Arbeit mit beigetragen haben:

Prof. Dr. Clemens Simmer und PD Dr. Michael Bittner für die Betreuung meiner Arbeit.

Dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Deutschen Fernerkundungs-Datenzentrum (DFD) für die Möglichkeit, diese Doktorarbeit anzufertigen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe „Klima- und Atmosphärenprodukte“ für die Unterstützung bei wissenschaftlichen und technischen Fragen und für die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr. Kurt Günther und allen (auch ehemaligen) Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Teams „Wechselwirkungen Biosphäre-Atmosphäre“ für viele interessante Diskussionen.

Bei Dr. Wolfgang Knorr und seinen Kollegen vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena möchte ich mich für die Verfügbarkeit des BETHY-Modells und die Einweisung in das Modell bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei Lucia Hallas für das Korrekturlesen meiner Arbeit bedanken und für ihre Unterstützung und Motivation während meiner Arbeit. Bei meinen Eltern bedanke ich mich an dieser Stelle dafür, dass sie mir mein Studium ermöglicht und damit die Grundlage für diese Arbeit mitgeschaffen haben.

Nicht vergessen möchte ich Prof. Dr. Heinz-Dieter Schilling (†1997), der mein Interesse am Themenkreis „Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre“ geweckt hat.