

GIS-gestützte Modellierung und Analyse von Agrar-Biomassepotenzialen in Niedersachsen – Einführung in das Pflanzenmodell BioSTAR

Dissertation
zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades

"Doctor rerum naturalium"

der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm Geografie

der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

Roland Bauböck

aus Hamburg

Göttingen, 2012

Betreuungsausschuss

Prof. Dr. Martin Kappas, Abt. Kartografie, GIS und Fernerkundung, Institut für Geografie der Universität Göttingen

PD Dr. Marianne Karpenstein-Machan, Forschungsprojekt „Bioenergie im Spannungsfeld“, Universität Göttingen

Mitglieder der Prüfungskommission

Referent/in: Prof. Dr. Martin Kappas, Abt. Kartografie, GIS und Fernerkundung, Institut für Geografie der Universität Göttingen

Korreferent/in: PD Dr. Marianne Karpenstein-Machan, Forschungsprojekt „Bioenergie im Spannungsfeld“, Universität Göttingen

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

- 1) Prof. Dr. Gerhard Gerold, Universität Göttingen
- 2) Prof. Dr. Karl-Heinz Pörtge, Universität Göttingen
- 3) Prof. Dr. Hans Ruppert, Universität Göttingen
- 4) Dr. Udo Müller, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover
- 5) Dr. Stefan Erasmi, Universität Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 22.01.2013

Danksagung

Die vorliegende Promotionsarbeit wäre ohne die Unterstützung und die vielen Ratschläge und Anregungen von Prof. Dr. Martin Kappas (Universität Göttingen), PD Dr. Marianne Karpenstein-Machan (Projekt „Bioenergie im Spannungsfeld“), Dr. Udo Müller (LBEG Hannover) und vielen anderen nicht zustande gekommen. Meine neunmonatige Mitarbeit am LBEG im Jahr 2008/2009 und der rege Gedankenaustausch mit Dr. Udo Müller und anderen Kollegen dort haben den Grundstein für diese Arbeit geliefert. Auch die Zurverfügungstellung von Klima- und Bodendaten seitens des LBEG hat maßgeblich zum Gelingen dieser Forschungsarbeit beigetragen. Die spätere Mitarbeit im BIS-Team (Bioenergie im Spannungsfeld) und der disziplinübergreifende Dialog mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Agrar-, Geo- und Gesellschaftswissenschaften haben wichtige Impulse für die Forschungsarbeit gegeben. Insbesondere möchte ich noch einmal Prof. Dr. Martin Kappas und PD Dr. Marianne Karpenstein-Machen für die vielen kleinen Einblicke in ihr reichhaltiges Wissen aus den Bereichen der Geografie und den Agrarwissenschaften danken, sie haben mit vielen Tipps, Ideen und Anregungen entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Carsten Rieckmann von der LWK-Niedersachsen für das Zusammenstellen der Ertrags- und Klimadaten der Versuchsstandorte Poppenburg und Werlte, auch sie haben einen wichtigen Baustein für die vorliegende Arbeit geliefert.

Mein Dank gilt auch dem niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK), durch dessen Förderung die Mitarbeit im Forschungsverbundvorhaben „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“ ermöglicht worden ist.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelzeichen und Abkürzungen.....	VII
Zusammenfassung.....	XIII
Summary	XIII
1. Zielsetzung und Einleitung.....	1
2. Biomassemodellierung – ein Überblick.....	4
2.1 Gruppe 1 – Kohlenstoffbasierter Ansatz	7
2.2 Gruppe 2 – Strahlungsbasierter Ansatz.....	8
2.3 Gruppe 3 – transpirations- oder wasserbasierter Ansatz	10
3. Das Modell BioSTAR und dessen Rechenabläufe	11
3.1 Der Wachstumsmotor	13
3.2 Transpiration und Verhältnis von CO ₂ -Umsatz zum Wasserumsatz	17
3.3 Das Bodenwasser	23
3.3.1 Wasserbilanzierung	23
3.3.2 Bodensaugspannung und Wasserentzug durch die Wurzeln.....	25
3.3.3 Der pF-Wert als Transpirations- und Fotosynthesebremse	28
3.3.4 Der aerodynamische Verdunstungswiderstand (Ra).....	30
3.4 Die Durchwurzelung des Bodens.....	31
3.5 Der Stickstoffhaushalt in Boden und Pflanze	34
3.5.1 Die N-Nettomineralisation	34
3.5.2 Die Stickstoffaufnahme der Pflanzen	38
3.6 Die Entwicklungssteuerung	40
3.6.1 Die Pflanzenentwicklung	40
3.6.2 Blattflächenbildung, Sensenz und Abreife.....	42
3.6.3 Wurzelbiomasse und Ertragsbildung.....	46
3.6.4 Wassermangel und Ertragsbildung	48
3.7 Die Veratmung (Dissimilation) und die Nettofotosynthese	49
4. Modellierung von Biomassepotenzialen	51
4.1 Modelldefinition.....	51
4.2 Modellvalidierung.....	53

4.2.1 Kalibrierung eines Modells	54
4.2.2 Kalibrierung des Modells BioSTAR.....	54
4.2.3 Das Versuchsgut Poppenburg	55
4.2.4 Das Versuchsgut Werlte	55
4.2.5 Kalibrierung und Validierung Mais (<i>zea mays</i>).....	57
4.2.6 Kalibrierung und Validierung Wintergetreide	61
4.2.7 Kalibrierung und Validierung Sonnenblume (<i>helianthus annuus</i>).....	64
4.2.8 Kalibrierung und Validierung Sorgum (<i>sorghum bicolor</i>).....	66
5. Sensitivitätsanalyse	68
5.1 Die Eingangsdaten	68
5.2 Modellergebnisse	75
5.2.1 Die Ertragshöhen	75
5.2.2 Die aktuellen Verdunstungshöhen (E_t)	79
5.2.3 Der Evapotranspirationskoeffizient.....	81
6. Anwendung des Modells für Ertragsprognosen	82
6.1 Eingangsdaten und Vorgehensweise.....	82
6.2 Darstellungen der Bodenverhältnisse in den drei Landkreisen	85
6.3 Darstellungen der Ertragspotenziale.....	86
6.4 Vergleich der Modellergebnisse mit Erntestatistiken	86
6.5 Berechnung von Gesamtbiomasse-, Gas- und Primärenergieerträgen	88
7. Landwirtschaft: regional bis international – ein Überblick	90
7.1 Landwirtschaft in Niedersachsen	90
7.1.1 Struktur der niedersächsischen Landwirtschaft.....	91
7.2 Die deutsche Landwirtschaft.....	93
7.2.1 Pflanzenproduktion	93
7.2.2 Tierproduktion.....	93
7.2.3 Einordnung in den internationalen Kontext.....	94
7.3 Europäische Landwirtschaft	94
7.3.1 Pflanzenproduktion	94
7.3.2 Tierproduktion.....	95
7.4 Landwirtschaft – global	96
7.4.1 Erntemengen und Flächeninanspruchnahme wichtiger Agrarerzeugnisse	96
7.4.1.1 Weltproduktion Getreide	96
7.4.1.2 Weltproduktion Zuckerpflanzen	96
7.4.1.3 Weltproduktion Ölpflanzen.....	97

7.4.1.4 Weltproduktion Hülsenfrüchte	97
7.4.1.5 Weltproduktion Wurzeln und Knollen	97
7.4.1.6 Welttierhaltung und -Tierproduktion.....	98
7.4.1.7 Weltagrarhandel.....	98
7.4.1.8 Weltagrarpopulation	98
7.4.1.9 Zusammenfassung.....	99
7.4.5 Ökologische Landwirtschaft – Ein globaler Überblick	101
8. Biomassepotenziale und Bioenergienutzung	102
8.1 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung in Niedersachsen	102
8.1.1 Biomassepotenziale Niedersachsen	104
8.2 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung in Deutschland	106
8.2.1 Potenziale für Biogas	108
8.2.2 Potenziale Stroh	108
8.2.3 Potenziale Treibstoffe	109
8.2.4 Potenziale Holz	109
8.3 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung global	111
9 „Fleisch frisst Land“	115
9.1 Globale Nahrungsmittelverbrauchstrends.....	115
9.2 Ökologische Problematiken im Bereich der Tierproduktion	118
9.2.1 Flächenverbrauch, -Umnutzung und -Degradation.....	118
9.2.2 Treibhausgasemissionen	119
9.2.3 Der Wasser-Fußabdruck der Tierhaltung (Ökobilanzierung des Wasserverbrauchs).....	121
9.2.4 Flächenbedarf und ökologischer Fußabdruck tierischer und pflanzlicher Nahrungsmittel	124
9.3 Gesundheitsrisiken eines hohen Fleischkonsums	125
9.4 Steigender Fleischkonsum als globales Problem.....	127
9.5 Mögliche Flächenfreisetzung in Deutschland durch reduzierten Fleischkonsum.....	131
10. Zusammenfassung und Ausblick	135
11. Literaturverzeichnis.....	138
12. Anhang.....	152

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1 (1): Die Eingabemaske (GUI-Process) des Modells BioSTAR.....	12
Abb. 3.1 (2): Die Ausgabemaske (GUI-Results) des Modells BioSTAR.....	13
Abb. 3.3.2.1 (3): Flussdiagramm der Prozesszusammenhänge des Modells BioSTAR.....	27
Abb. 3.3.2.2 (4): Berechnung der potenziellen Transpirationshöhe (TRANSPOT) in Abhängigkeit von der Fotosyntheseleistung.....	28
Abb. 3.5.1.1 (5): Kumulative N-Nettomineralisation aufgelöst nach Nfast und Nslow sowie Inkubationsdauer.	35
Abb. 3.5.1.2(6): Temperaturfunktionen (polynomisch) für k_{fast} für Bodentypen A, B und C.....	36
Abb. 3.5.1.3(7): Temperaturfunktionen (polynomisch) für k_{slow} für Bodentypen A, B und C.....	37
Abb. 3.5.1.4(8): Wassergehaltfunktion (polynomisch) für relative N-Nettomineralisation.	38
Abb. 3.6.1.1(9): Entwicklung der Maispflanze mit BBCH-Code Stadien.....	40
Abb. 3.6.2.1(10): Polynomische Kurvenanpassung (Gauss-Normalverteilung) für den BFI-Verlauf	44
Abbildung 4.1.1(11): Hierarchische Klassifikationen für Pflanzenmodelle.	52
Abbildung 4.1.2(12): Typen von Modellen (empirisch, mechanisch), Zunahme von Fähigkeiten und Entwicklung von Umfang und Komplexität.	53
Abb. 4.2.5.1(13): Ertragskurven (Real und Modell) für Werlte.....	59
Abb. 4.2.5.2(14): Ertragskurven (Real und Modell) für Poppenburg.....	59
Abb. 4.2.6.1(15): Säulendiagramm für gemessene und berechnete Erträge in Poppenburg für Wintergetreide.....	63
Abb. 4.2.6.2(16): Säulendiagramm für gemessene und berechnete Erträge in Werlte für Wintergetreide.....	63
Abb.4.2.7.1(17): Säulendiagramm und Ertragskurven für Poppenburg für Sonnenblume.....	65
Abb. 4.2.7.2(18): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Werlte für Sonnenblume.....	65
Abb. 4.2.8.1(19): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Poppenburg für Sorghum.....	67
Abb. 4.2.8.2(20): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Werlte für Sorghum.....	67
Abb. 5.1(21): Klimadiagramm Almati, Kasachstan.....	68
Abb. 5.2(22): Klimadiagramm Bologna, Italien.....	69
Abb. 5.3(23): Klimadiagramm Denver, USA.....	69
Abb. 5.4(24): Klimadiagramm Fresno, USA.....	70
Abb. 5.5(25): Klimadiagramm Indianapolis, USA.....	70
Abb. 5.6(26): Klimadiagramm List, Deutschland.....	71
Abb. 5.7(27): Klimadiagramm Palermo, Italien.....	71
Abb. 5.8(28): Klimadiagramm Stockholm, Schweden.....	72
Abb. 5.9(29): Klimadiagramm Tessalit, Mali.....	72
Abb. 5.10(30): Klimadiagramm Lagos, Nigeria.....	73
Abb. 5.2.1.1(31): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Schluffboden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.	78
Abb. 5.2.1.2(32): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Lehmboden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.	78
Abb. 5.2.1.3(33): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Sandboden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.	79
Abb. 5.2.2.1(34): Potenzielle Evapotranspiration (ETo) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Schluffboden.....	79

Abb. 5.2.2.2(35): Potenzielle Evapotranspiration (ET _o) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Lehmboden.....	80
Abb. 5.2.2.3(36): Potenzielle Evapotranspiration (ET _o) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Sandboden.....	80
Abb. 5.2.3.1(37): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Schluffboden.....	81
Abb. 5.2.3.2(38): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Lehmboden.....	82
Abb. 5.2.3.3(39): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Sandboden.....	82
Abb. 12.1(40): Lage der 10 Stationen auf Satellitenbilddaufnahme Erde. Quelle: (NASA, 2012).....	152
Abb. 12.2(41): Bodenpunkte Region Hannover.....	153
Abb. 12.3(42): NFKWE Region Hannover.....	154
Abb. 12.4(43): Ertragspotenzial Mais für Region Hannover.....	155
Abb. 12.5(44): Ertragspotenzial Sorghum für Region Hannover.....	156
Abb. 12.6(45): Ertragspotenzial Triticale für Region Hannover.....	157
Abb. 12.7(46): Ertragspotenzial Sonnenblume für Region Hannover.....	158
Abb. 12.8(47): Bodenpunkte Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	159
Abb. 12.9(48): NFKWE Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	160
Abb. 12.10(49): Ertragspotenzial Mais für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	161
Abb. 12.11(50): Ertragspotenzial Sorghum für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	162
Abb. 12.12(51): Ertragspotenzial Triticale für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	163
Abb. 12.13(52): Ertragspotenzial Sonnenblume für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel.....	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.2.5.1(1) und Tabelle 4.2.5.2(2) Mais Poppenburg (links)u. Mais Werlte (rechts).....	58
Tabelle 4.2.6.1(3): Wintergetreide Poppenburg (links)u. Werlte(rechts).....	60
Tabelle 4.2.7.1(4) und Tabelle 4.2.7.2(5): Sonnenblume Werlte (links)u. Poppenburg (rechts).....	64
Tabelle 4.2.8.1(6) und Tabelle 4.2.8.2(7): Sorghum Poppenburg (links) u. Werlte(rechts).....	66
Tabelle 5.1.1(8): Für das Modell AquaCrop in der Sensitivitätsanalyse verwendete Bodenparameter	74
Tabelle 5.1.2(9): van Genuchten Parameter für Sensitivitätsanalyse (Modell BioSTAR).....	74
Tabelle 5.2.1.1(10): Berechnete Maiserträge (in Tonnen/ha) für die 10 Orte und 3 Bodenarten jeweils für das Modell BioSTAR (BS) und das Modell AquaCrop (AC).....	75
Tabelle 5.2.1.2(11): Potenzielle Evapotranspiration in mm nach Penman-Monteith für die zehn Standorte im Simulationszeitraum.....	75
Tabelle 5.2.1.3(12): aktuelle Evapotranspiration (E _{t,a}) in mm nach Modellberechnungen für die zehn Standorte im Simulationszeitraum (uu = Schluff, lt = lehmiger Ton, ss = Sand)......	76
Tabelle 5.2.1.4(13): Klimatische Wasserbilanz (KWB) in der Simulationsperiode für die 10 Standorte	77
Tabelle 6.1.1(14): Faktor_Z, Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der modellierten Erträge für Triticale, Sonnenblume, Silomais und Sorghum sowie selbige für die NFKWE und die Bodenpunkte für die Landkreise Goslar, Hannover und Wolfenbüttel.....	85
Tabelle 6.4.1(15): Vergleich der statistisch erfassten Ertragshöhen für Triticale (1988-2000) und Silomais (1978-2000) und den vom Modell generierten Erträgen sowie die Abweichung derer in %. 87	87
Tabelle 6.4.2(16): Vergleiche und Abweichungen von langjährigen Silomais- und Triticaleerträgen für die drei Landkreise und Gesamtniedersachsen.....	87
Tabelle 6.5.1(17): Umrechnungstabelle Flächenerträge (t/ha) auf Primärenergieertrag für Goslar....	88

Tabelle 6.5.2(18): Umrechnungstabelle Flächenerträge auf Primärenergieertrag für Hannover	88
Tabelle 6.5.3(19): Umrechnungstabelle Flächenerträge auf Primärenergieertrag für Wolfenbüttel...	88
Tabelle 6.5.4(20): Biogas- und Methanerträge (berechnet mit Faustzahlen nach FNR u. LWK) für die vier modellierten Kulturen.	89
Tabelle 6.5.5(21): Berechnung des niedersächsischen Primärenergiepotenzials aus Biogas unter Zuhilfenahme der Biomasse- und Primärenergiepotenziale aus den drei Landkreisen.	90
Tabelle 7.1.1(22): Bruttowertschöpfung von Land-u. Forstwirtschaft u. Fischerei in den Flächenländern in Mrd. Euro und als Anteil an der Bruttowertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche.	92
Tabelle 7.1.2(23): Produktionswerte der Landwirtschaft in Niedersachsen sowie Aus- und Einfuhrwerte von Gütern der Ernährungswirtschaft und die Anteile von tierischen/pflanzlichen Produkten hieran.....	93
Tabelle 7.3.1(24): Wichtige EU-Länder und Türkei bei der Pflanzenproduktion 2010 sowie Vergleich mit Weltproduktion.....	95
Tabelle 7.3.2(25): Wichtige Länder bei der Tierproduktion in der EU-27 aus dem Jahr 2010.....	95
Tabelle 7.4.1(26): Wichtige Agrarproduzenten (Staaten) und sowie deren Agrarex- und Importe	99
Tabelle 7.4.2(27): Wichtige Produzenten von Getreide und Hülsenfrüchten.....	100
Tabelle 7.4.3(28): Wichtige Produzenten von Zuckerpflanzen sowie von Wurzeln u. Knollen	100
Tabelle 7.4.4(29): Stückzahlen von Hühnern sowie von Rindern und Büffeln	100
Tabelle 7.4.5(30): Stückzahlen von Schafen und Ziegen sowie von Eseln und Maultieren	101
Tabelle 7.4.5.1(31): Rangskalierung ausgewählter Länder hinsichtlich Gesamtanbaufläche und prozentualer Anbaufläche (an der Gesamtagrarfläche) des ökologischen Landbaus	102
Tabelle 8.2.3.1(32): Minimum, Maximum und Mittel der potenziellen Biomasseerträge	110
Tabelle 8.3.1(33): Energieoutput verschiedener Biomassenutzungspfade	113
Tabelle 9.1.1(34): Entwicklung des Pro-Kopf Kalorienverbrauchs von 1969 – 2050 nach Weltregionen.	115
Tabelle 9.1.2(35): Entwicklung des Lebensmittelbedarfs von 1969/71 bis 2050 nach Kategorien und Ländergruppierungen in kg pro Kopf und Jahr.....	117
Tabelle 9.2.2.1(36): THG-Emissionen verschiedener Lebensmittel tierischen und pflanzlichen Ursprungs.	121
Tabelle 9.2.3.1(37): Futter-Konversionseffizienz für verschiedene Tier- und Produktionsarten.....	122
Tabelle 9.2.3.2(38): Wasserverbrauch in Litern pro Nährwerteinheit versch. Lebensmittel.	123
Tabelle 9.3.1(39): Flächenbedarf für die Produktion von verschiedenen Lebensmitteln.....	125
Tabelle 9.4.1(40): Eiweiß- und Kaloriengehalte in verschiedenen pflanzlichen Nahrungsmitteln im Vergleich zu Fleisch und Milch	130
Tabelle 12.1(41): Klimadaten für Almati, Bologna, Denver, Fresno.....	165
Tabelle 12.2(42): Klimadaten für Indianapolis, List, Palermo, Stockholm	166
Tabelle 12.3(43): Klimadaten für Tessalit und Lagos	167
Tabelle 12.4(44): Tagesklimawerte Poppenburg 1. April – 30. September 2007 - 2010	168
Tabelle 12.5(45): Tagesklimawerte Werlte 1. April – 30. September 2006 - 2009	172

Formelzeichen und Abkürzungen

Kürzel	Beschreibung	Einheit
AC	: Modell AquaCrop	
AKW	: Atomkraftwerk	
BBCH	: Wachstumsstadienskala für Kulturpflanzen	dimensionslos
BFI	: Blattflächenindex (auch LAI)	[m ² * m ⁻²]
BGA	: Biogasanlage	
BHKW	: Blockheizkraftwerk	
BioSTAR	: Biomass Simulation Tool for Agricultural Resources	
BRD	: Bundesrepublik Deutschland	
BS	: Modell BioSTAR	
BtL	: Biomass to Liquid	
Bük50	: Bodenübersichtskarte 1:50.000	
C, N, P	: Kalzium, Stickstoff, Phosphor (Dünger)	
C ₃	: C ₃ -Metabolismus (Pflanzengruppe)	
C ₄	: C ₄ -Metabolismus (Pflanzengruppe)	
C _a	: CO ₂ -Gehalt der Luft	ppm
CH ₄	: Methan	
C _i	: CO ₂ -Gehalt im Blattinneren	ppm
C _i /C _a	: CO ₂ -Verhältnis vom Blattinneren zur Atmosphäre	dimensionslos
cm	: comprehensive model	
cm	: Zentimeter	
CO ₂	: Kohlendioxid	
CO ₂ e	: CO ₂ -Äquivalente	
C _p	: Spezifische Wärme der Luft	1033 [kJ / kg°C]
DBFZ	: Deutsches Biomasseforschungszentrum	
DGE	: Deutsche Gesellschaft für Ernährung	

dm ³	: Kubikdezimeter	
DWD	: Deutscher Wetterdienst	
EE	: Erneuerbare Energien (s. S. 14)	
EEG	: Erneuerbare Energien-Gesetz (s. S. 14)	
EJ	: Exajoule	
el.	: elektrische Leistung	
$e_s - e_a$: Sättigungsdefizit der Luft (Wasserdampf)	kPa
ET ₀	: Bezugs-Evapotranspirationsmenge	[mm * Tag ⁻¹]
Et _a	: aktuelle Evapotranspiration	[Liter * m ⁻² * h ⁻¹]
ET _{act}	: aktuelle Evapotranspiration	[Liter * m ⁻² * h ⁻¹]
ETK	: Evapotranspirationskoeffizient	[Liter * kg ⁻¹]
Et _o	: potenzielle Evapotranspiration	[Liter * m ⁻² * h ⁻¹]
ET _{pot}	: potenzielle Evapotranspiration	[Liter * m ⁻² * h ⁻¹]
EU-27	: Europäische Union (27 Mitgliedstaaten)	
FAO	: Food and Agricultural Organisation	
FK	: Feldkapazität (Speichermenge Bodenwasser)	Vol%
FNR	: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe	
G	: Bodenwärmestrom	[MJ * m ⁻² * Tag ⁻¹]
g	: Gramm	
GB	: Great Britain	
GIS	: Geografisches Informationssystem	
Gm ³	: Giga-Kubikmeter	
GPV	: Gesamtporenvolumen	Vol%
g _s	: Leitfähigkeit des Blattes für Wasserdampf	[mmol * m ⁻² * s ⁻¹]
GV	: Großvieheinheit	500 kg Tiergewicht
h	: Stunde	
ha	: Hektar	
hPa	: Hektopascal	

IEA	: Internationale Energieagentur	
k	: Extinktionskoeffizient	dimensionslos
k_0	: gesättigte Leitfähigkeit des Bodens für Wasser	$[\text{cm} * \text{Tag}^{-1}]$
KA5	: Kartieranleitung 5 der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden	
K_c	: Phänologie- und kulturspezifischer Multiplikator	dimensionslos
Kcal	: Kilokalorien	
kg	: Kilogramm	
kPa	: Kilopascal	
K_s	: auch gesättigte Leitfähigkeit des Bodens für Wasser	$[\text{cm} * \text{Tag}^{-1}]$
KUP	: Kurzumtriebsplantage	
kW	: Kilowatt	
KWB	: Klimatische Wasserbilanz	
kWh	: Kilowattstunde	
l	: Liter	
LAI	: Leaf Area Index (auch BFI)	
LF	: Landfläche	$[\text{m}^2 * \text{m}^{-2}]$
LI/II	: lehmiger Lehm	
Lt/lt	: lehmiger Ton	
Lu/lu	: schluffiger Lehm	
m	: van Genuchten Parameter m	
m^2	: Quadratmeter	
m^3	: Kubikmeter	
MJ	: Megajoule	
mm	: Millimeter	
mmol	: Millimol	
mol	: 1 Mol = $6,022 * 10^{23}$ Teile eines Stoffes	
MPa	: Megapascal	
MW	: Megawatt	

n	: van Genuchten Parameter n	
N ₂ O	: Distickstoffmonoxid	
Nawaro	: Nachwachsende Rohstoffe	
nFK	: nutzbare Feldkapazität	
nFKWe	: nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum	mm
NFKWE	: auch nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum	mm
NH ₄	: Ammonium	mm
NIBIS®	: Niedersächsisches Bodeninformationssystem	
NN	: Normal Null (Meereshöhe)	
NO ₃	: Nitrat	
NR-NCD	: Nutrition Related Non-Communicable Diseases	
OECD	: Organization for Economic Cooperation and Development	
ÖFA	: Ökologischer Fußabdruck	
ρ_0	: Luftdichte	
PAR	: Photosynthetic Active Radiation	[Gramm * m ⁻³]
PE	: Produktionsebene	
pF	: Logarithmus der Wasserspannung (pF = log Ψ)	
Pg	: Petagramm	dimensionslos
PJ	: Petajoule	
PPFD	: Photosynthetic Photon Flux Density	
PPFDI	: Photosynthetic Photon Flux Density Intercepted	[mmol * m ⁻² * s ⁻¹]
PWP	: Permanenter Welkepunkt	[mmol * m ⁻² * s ⁻¹]
Q	: Lichtquantum	Vol%
Qe	: Quantum Efficiency	[mol * s ⁻¹]
r _a o. Ra	: Aerodynamischer Widerstand	[mol CO ₂ * mol Q ⁻¹]
RJ	: Radiation in Joule	[s * m ⁻¹]
RMSE	: Root Mean Squared Error	
R _n	: Netto-Strahlung	

r_s o. R_s	: Stomata Widerstand für Wasserdampf	[MJ * m ⁻² * Tag ⁻¹]
RUE	: Radiation Use Efficiency (Strahlungsnutzungseffizienz)	[s * m ⁻¹]
s	: Sekunde	[Gramm * Joule ⁻¹]
sm	: summary model	
SPAC	: Soil Plant Atmosphere Continuum	
SS/ss	: sandiger Sand	
T	: Temperatur in Grad Kelvin	
t	: Tonne (Gewicht)	
THG	: Treibhausgase	
T_{cel}	: Temperatur in Grad Celsius	
Tr	: Transpiration	Grad Celsius
Tu/tu	: toniger Schluff	Liter
TWh	: Terrawattstunde	
U_2	: Windgeschwindigkeit	
UN	: United Nations	[m * s ⁻¹ in 2 m Höhe]
USA	: United States of America	
UU/uu	: schluffiger Schluff	
Vol%	: Volumen Prozent	
WBGU	: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen	Prozent
WFA	: Wasserfußabdruck	
WHO	: Weltgesundheitsorganisation	
WLD	: Wurzellängendichte	
WP	: Water Productivity	[cm * cm ⁻³]
WUE	: Water Use Efficiency	[Gramm * Liter ⁻¹]
WWF	: World Wildlife Fund (NGO)	[Liter * kg ⁻¹]
x	: van Genuchten Parameter x	
α	: van Genuchten Parameter alpha	
Δ	: Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	

Formelzeichen und Abkürzungen Seite XII

θ	: aktueller Bodenwassergehalt	[kPa * T ⁻¹]
θ_{nFK}	: Bodenwassergehalt bei Feldkapazität	Vol%
θ_r	: residueller Wassergehalt	Liter
θ_s	: Bodenwassergehalt bei Sättigung	Vol%
λ	: Psychrometerkonstante	Vol%
ψ	: Bodensaugspannung	[kPa * T ⁻¹] cm Wassersäule

Zusammenfassung

Über Energie-Biomassepotenziale wird z.T. kontrovers diskutiert. Einerseits ist der Ausbau der Bioenergienutzung politisch gewollt (sowohl hierzulande als auch international), andererseits steht der Energiepflanzenanbau in direkter Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion.

In der vorliegenden Arbeit wird der Frage nachgegangen, wie sich Biomassepotenziale bestimmen lassen und welche mathematischen Modellansätze es hierfür gibt.

Zunächst wird die grundlegende Funktionsweise von einigen Pflanzenmodellen sowie deren Einsatz für die Biomassepotentialbestimmung erläutert und anhand eines neu entwickelten Modells, dem Modell BioSTAR, näher beschrieben. Das Modell BioSTAR ist ein kohlenstoffbasiertes Pflanzenmodell (Azam-Ali, et al., 1994) und liegt als in Java programmiertes Software-Produkt vor. Mit dem Modell lassen sich die Biomassepotenziale und der Wasserverbrauch von verschiedenen Ackerkulturen in Abhängigkeit von Klima- und Bodenfaktoren ermitteln. Das Modell ist zurzeit für vier Winterungen und drei Sommerungen validiert und wurde im Rahmen dieser Arbeit für eine Energie-Biomassepotentialanalyse für den Raum Niedersachsen herangezogen.

Weiterhin wird der Frage nachgegangen, wie ein bereits hoher und nach FAO-Prognosen (FAOSTAT, 2006) weiterhin steigender globaler Fleisch- und Milchproduktkonsum zu Umweltproblematiken im Agrarbereich führt und die für die Welternährung zur Verfügung stehende Agrarfläche unnötig verknappt. Eine Reduzierung des Fleischkonsums auf die DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung)-Empfehlungsmengen könnte hierzulande große Flächen freisetzen und somit dazu beitragen, die Konkurrenz zwischen dem Energiepflanzenanbau und der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu entschärfen.

Summary

Biomass potentials for energy production are discussed controversially. On the one hand, the further expansion of the bio energy sector is demanded by the policy makers (in Germany and elsewhere), and on the other hand, energy crop cultivation is in direct competition with food and feed production and is criticized in this point. In the book presented here, questions concerning mathematical models for the determination of biomass potentials are discussed.

In a first step some of the basic features of some chosen crop models are discussed, and then explained in a second step in more detail by the example of a new crop model, the model BioSTAR.

The Model BioSTAR is a carbon based model (Azam-Ali, et al., 1994) which is programmed as a Java software tool. The model can compute biomass potentials and the water usage of a number of different agricultural crops in dependence of soil and climate conditions. Currently the model is calibrated and validated for four winter cereals and three summer cultures, and has been employed

in this dissertation to determine the energy biomass potentials for Lower Saxony. In the second part of the paper, the globally high and still rising consumption of foods from animal origins (FAOSTAT, 2006) and its impact on the environment and on land use of the agricultural sector is critically discussed. A reduction of the meat consumption in Germany, down to the amounts recommended by the DGE (German Society of Nutrition), could vacate considerable amounts of agricultural area and could therefore help to mitigate the competition problem of agricultural food, feed and energy production.

1. Zielsetzung und Einleitung

Zielsetzung

Wissenschaftliches Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein geeignetes Pflanzenmodell zu entwickeln, mit dem agrarische Energie-Biomassepotentiale in Abhängigkeit von Boden- und Klimaverhältnissen für beliebige Standorte abgeschätzt werden können. Dieses Modell ist dann anhand von gemessenen Ertragsdaten aus Anbauversuchen validiert und für die Berechnung von Energie-Biomassepotenzialen für drei niedersächsische Landkreise (Goslar, Wolfenbüttel, Region Hannover) herangezogen worden. Weiterhin wurde in einem Modellszenario untersucht, wie sich ein verringerter Fleischkonsum auf den Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion in Deutschland auswirken könnte. Durch eine Freisetzung von Agrarflächen könnte dann z.B. die hierzulande als knapp geltende Fläche für die Bioenergieproduktion ausgeweitet werden.

Einleitung

Die Energiewende ist, spätestens seit der Reaktorkatastrophe in Japan 2012, in Deutschland ein politisch gewolltes Ziel. Über den Ausbau der erneuerbaren Energien (Wind, Solar, Biomasse und Wasser, EE) sowie Effizienzsteigerungen soll der endgültige Ausstieg aus der Atomenergie in Deutschland bis zum Jahr 2022 bewerkstelligt werden (Bundestag, 2011)

Doch um zum gegenwärtigen Zeitpunkt markt- und konkurrenzfähig zu sein, müssen die EE, insbesondere Solar- und Bioenergie, noch durch staatliche Förderprogramme (über die EEG-Umlage) subventioniert werden. In jüngster Zeit sind sowohl die starke Förderung und der damit verbundene Ausbau der Solarenergie (DPA, 2012) aber auch die der Bioenergie zunehmend in die Kritik geraten.

Im Bereich der Bioenergieförderung ist es im Bereich der Biogasanlagen in den letzten Jahren zu einem starken Anstieg gekommen, der bei einer stetig wachsenden Biogasanlagenzahl zu einer Ausweitung der Maisanbauflächen und als Folge hiervon zu Protesten aus der Bevölkerung und zu Bedenken von Seiten der Naturschutzverbände geführt hat (NABU-Niedersachsen, 2006) (NABU-Schleswig-Holstein, 2012).

Auch die stetig steigenden Strompreise werden dem Zubau von Solar- und der Biogasanlagen im Rahmen der Energiewende zu Lasten gelegt (BÖR, 2012) (Focus-Online, 2012).

Aber auch die Biokraftstoffgewinnung (Ethanol und Biodiesel) und die Einführung des neuen E10-Kraftstoffs an deutschen Tankstellen im Jahr 2010 haben viele Kritiker auf den Plan gerufen. Kritikpunkte sind der hohe Flächenverbrauch bei dieser Sparte der Bioenergiegewinnung (Flächenineffizienz) sowie die sozialen und ökologischen Folgen der weltweiten Ausweitung von Anbauflächen für Mais, Soja, Zuckerrohr und Ölpalmen für die Energiegewinnung. Immer wieder wird der Bioenergie vorgeworfen, dass sie als Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion die Situation für

die Hungernden dieser Erde weiter verschärfen würde („Tank oder Teller“-Diskussion) (Leopoldina, 2012).

Somit sind einerseits die Verfügbarkeit von Energie-Biomasse, und andererseits der Preis und die Flächeninanspruchnahme für deren Gewinnung und die Art der Bereitstellung die zentralen Fragestellungen bei der Diskussion um die Bioenergienutzung.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, wie Biomassepotentiale anhand von Pflanzenmodellen und über statistische Verfahren ermittelt werden können, welche Stellung der Energiepflanzenanbau im Gesamtkontext der niedersächsischen, der deutschen und der globalen Landwirtschaft hat und wie viel Ausbaupotentiale es hier noch gibt.

Als Werkzeug für die Biomassemodellierung wird in dieser Arbeit das neu entwickelte Pflanzenmodell BioSTAR (**B**iomass **S**imulation **T**ool for **A**gricultural **R**esources) eingeführt, welches im Rahmen der Arbeit anhand von Ertragsdaten aus Anbauversuchen getestet und validiert wurde.

Mit dem Modell BioSTAR wird mit einer Beispielmodellierung für vier Kulturen (Mais, Triticale, Sonnenblume, Sorghum) und für drei Landkreise Niedersachsens (Hannover, Goslar, Wolfenbüttel) ein Energie-Biomassepotential ermittelt. Aus den Modellergebnissen der drei Kreise wird dann unter Zuhilfenahme von Statistikdaten ein Bioenergiepotential für Gesamtniedersachsen berechnet und dieses mit bestehenden Potentialberechnungen verglichen.

Im letzten Teil der Arbeit wird der Frage nachgegangen, inwieweit nationale aber auch globale Ernährungsgewohnheiten und -Trends insbesondere eine steigende Nachfrage nach Lebensmitteln tierischen Ursprungs den Treibhauseffekt verstärken, die Ökosysteme belasten und zu einer Verknappung von Agrarflächen führen (Koerber, et al., 2009).

In den entwickelten Ländern wird schon seit vielen Jahrzehnten weit mehr Fleisch gegessen, als dies von Ernährungsexperten empfohlen wird, und in zahlreichen Studien sind mittlerweile die negativen Folgen eines hohen Fleischkonsums für die Gesundheit nachgewiesen worden (Campbell & Campbell, 2011) (Robbins, 2010). Eine steigende Weltbevölkerung und der sich in vielen Ländern entwickelnde Wohlstand werden den Fleischkonsum, und mit diesem die Tierhaltung, weiter ansteigen lassen (FAO, 2006). Bei der Fragestellung, wie viel Bioenergie hierzulande oder global erzeugt werden kann, muss hinterfragt werden, wie viel Agrarfläche wir für unsere Nahrungsmittelproduktion benötigen und ob sich gegenwärtige Trends in der Nahrungsmittelproduktion mit einem Zubau der Bioenergienutzung überhaupt vereinen lassen. Als gutes Beispiel kann hier zur Veranschaulichung die Nitratproblematik in der Veredelungsregion im Westen Niedersachsens mit ihrer hohen Viehdichte dienen (ML, 2012). Bereits bestehende Probleme der Nitratbelastung des Grundwassers in dieser Region (hohe Viehbesatzdichte, Futtermittelzukauf aus Übersee) werden hier durch den Zubau von Biogasanlagen, vermehrten Grünlandumbruch und Maisanbau zusätzlich verschärft und führen zur Kritik an der Bioenergie (Looden, 2011).

In Kapitel 9 wird gezeigt, dass durch die Reduktion des pro-Kopf Verbrauchs von Fleisch auf gesundheitlich unbedenkliche Mengen (DGE, 2012) und dessen Substitution mit pflanzlichen Nahrungsmitteln allein in Deutschland mehr als 2 Mio. ha Ackerland frei werden würden. Diese Flächen könnten z.B. für den Ökolandbau (höherer Flächenbedarf) und den Ausbau der Bioenergie genutzt werden.

2. Biomassemodellierung – ein Überblick

Für die Ermittlung von Ertragspotenzialen im Agrarbereich und von Biomassepotenzialen von Gebieten allgemein können verschiedene Methoden herangezogen werden. Als häufigste Methoden der großräumigen Biomassepotentialabschätzungen (global, kontinental, national) werden heute statistische Verfahren sowie deren Kombination mit Satellitenbilddauswertungen und/oder mit Modellen herangezogen. Beispiele für großräumige Modellierungen finden sich in WBGU (2009), BMU-BMELV (2009), BMVBS (2010), de Wit & Faaij (2008), Kaltschmidt & Hartman (2009).

Da von großräumigen Potentialanalysen nicht viel verwertbare Information auf eine feinere Maßstabsebene (Landkreise, Gemeinden, Betriebe) übertragbar ist, muss für diese Betrachtungsebene eine andere Methodik gewählt werden. Theoretisch denkbar wäre u.a. auch eine Analyse von Statistikdaten (Agrarstatistiken der statistischen Landesämter, Hofstatistiken). Hierbei ergeben sich allerdings einerseits das Problem der räumlichen Auflösung und der Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der Repräsentativität der Daten (Agrarstatistiken) sowie andererseits die schwierige Verfügbarkeit der Daten (Hofstatistiken).

Für eine genaue Ermittlung von kleinräumigen Ertragspotentialunterschieden im Agrarbereich kann die Methode der Modellierung mittels eines Pflanzenmodells herangezogen werden.

Pflanzenmodelle und deren Anwendungen im Bereich der Forschung und der Praxis haben eine lange Entwicklungsgeschichte, die bis in die 1960er Jahre zurückverfolgt werden kann (Bouman, et al., 1996).

Für die Biomassemodellierung steht heute eine Vielzahl von Pflanzenmodellen zur Verfügung (Ecobas, 2012).

Als für den Praxisgebrauch (Anbauplanung, Food-Security, Agrarpotentiale) tauglichste Modelle gelten heute sog. *summary models* (Jame & Cutforth, 1996). *Summary models* sind vereinfachende Weiterentwicklungen aus komplexeren Modellen, den sog. *comprehensive models*. *Summary models* nutzen vermehrt die aus den *comprehensive models* gewonnenen empirischen Zusammenhänge im Bereich der Pflanzenmodellierung. Zu den heute verwendeten (d.h. validierten und eingehend getesteten) generischen *summary models* zählen z.B. das DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer), APSIM (agricultural production systems simulator) sowie, als Neuzugang, das von der FAO verwendete Modell AquaCrop.

Je nach Auslegung der jeweiligen Modelle haben diese unterschiedliche Schwerpunkte und Genauigkeitsansprüche. Die DSSAT Modelle sind eine Weiterentwicklung und Zusammenführung der alten CERES-Modelle und DSSAT CROPGRO. Ihr Ansatz ist strahlungsbasiert (radiation use efficiency, light use efficiency) und das Spektrum an modellierbaren Kulturen sowie deren benötigte Input-Parameter ist vergleichsweise groß (> 10 und 49).

APSIM ist eine australische Entwicklung, basiert ebenso wie das DSSAT auf dem Strahlungsansatz und wurde insbesondere dafür ausgelegt, auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, also einer gesamten Produktionseinheit, die Bewirtschaftung zu modellieren und deren Stoffströme (Stickstoff, Erosion, Erträge) zu erfassen (McCown, et al., 1996)

Wie das DSSAT (siehe oben), braucht auch APSIM eine Vielzahl von Input-Parametern und differenzierte Informationen zu Stickstoffgehalten im Boden, um eine Simulation zu erzeugen.

AquaCrop ist ein Neuzugang unter den Pflanzenmodellen, basiert auf dem Wasserproduktivitätsansatz und kommt mit vergleichsweise wenigen Input-Parametern für eine Modellierung aus (33).

AquaCrop eignet sich aufgrund seines Wasserproduktivitätsansatzes insbesondere für die Ertragsmodellierung in Trockengebieten (Todorovic, et al., 2009).

Von den drei genannten Modellen würde sich das Modell AquaCrop aufgrund seines einfacheren Aufbaus (z.B. keine Berücksichtigung von Stickstoffströmen) noch am ehesten für die Modellierung von Biomassepotenzialen im Forschungsraum der vorliegenden Arbeit (Niedersachsen) eignen, es weist aber auch Nachteile auf, die für eine Anwendung in diesem Bereich negativ zum Tragen gekommen wären. In diesem Zusammenhang zu nennen sind z.B. die fehlende Möglichkeit, multiple Flächen gleichzeitig zu verarbeiten (ganze Landkreise), sowie fehlende Pflanzenparameter für manche Kulturen.

Das Modell CropSyst (Stöckle, et al., 2003) bietet für die Pflanzenmodellierung viele Optionen (mit oder ohne Stickstoffsimulation, Implementation von Fruchtfolgen), kann aber wiederum keine Klima-Monatsmittelwerte verarbeiten.

Aus dem näheren Forschungsumfeld (Inland) kämen für die Modellierung von Agrarpflanzen die Modelle der AGROSIM (Zentrum für Agrarlandforschung in Müncheberg) in Frage, aber auch hier wären wiederum nur wenige der gewünschten Kulturen modellierbar gewesen (W-Weizen, W-Roggen, W-Gerste, Zuckerrüben).

Für eine vereinfachende Klassifizierung lassen sich Pflanzenmodelle, je nach deren Ressourcennutzungsansatz, in drei Hauptgruppen einteilen (Azam-Ali, et al., 1994):

1. kohlenstoffbasiert
2. strahlungs- oder RUE (radiation use efficiency)-basiert
3. transpirations- oder wasserbasiert

Geschichtlich gesehen haben Pflanzenmodelle mit dem Kohlenstoffansatz die längste Tradition, mit ersten Modellierungsansätzen von de Wit (de Wit, 1965), (de Wit, et al., 1970).

Beim kohlenstoffbasierten Ansatz liegt der Schwerpunkt der Modellierung auf der Nachbildung der fotochemischen Bindung von CO₂ im Prozess der Fotosynthese (Abschnitt 2.1) sowie dessen Veratmung (Respiration).

Für diese Art der Modellierung werden pflanzenspezifische Lichtnutzungscurven (exponentiell oder hyperbolisch) (Boote & Loomis, 1991) verwendet, mit deren Hilfe sich das Verhältnis der von einer Pflanze aufgenommenen Strahlungsmenge (im Bereich 450 – 700 nm) zu der assimilierten CO₂-Menge bestimmen lässt.

Für die Veratmung bedient man sich pflanzenspezifischer Koeffizienten, mit denen das Verhältnis von Trockenmasseproduktion und Trockengesamtbiomasse zu den Veratmungsverlusten dargestellt wird (Amthor, 1998 ; Amthor, 2000).

Sowohl die Fotosynthese als auch die Veratmung unterliegen u.a. der Umgebungstemperatur, der Wasserverfügbarkeit sowie dem Stickstoffgehalt der Pflanze.

Der strahlungs-basierte Modellierungsansatz versucht die Komplexität der Vorgänge, die im kohlenstoffbasierten Ansatz einzeln nachgebildet werden, in einer Größe, der sog. *radiation use efficiency* (RUE) (Monteith, 1977), darzustellen und zu vereinfachen.

Bei der RUE wird jeweils der Anteil an fotosynthetisch aktiver Strahlung, der im Verlauf einer Vegetationsperiode (oder einem Ausschnitt hiervon) über dem Bestand gemessen werden konnte, mit der gebildeten Trockenbiomasse ins Verhältnis gesetzt.

Als Maßzahl für die Effizienz der Biomassebildung erhält man dann die RUE, gemessen in Gramm Trockenmasse pro aufgenommene Strahlungsmenge in Megajoule.

Alle im Ansatz 1 einzeln dargestellten Prozesse, wie etwa die Verwendung einer Lichtquantennutzungsfunktion und der Licht- und Dunkelatmung, werden in diesem einen Koeffizienten zusammengefasst. Der Vorteil eines einzelnen Koeffizienten liegt bei der einfacheren Handhabung des Prozesses und umgeht Unsicherheitsfaktoren bei der Nachbildung der Veratmung. Ein empirisch in einer Klima-Umgebung ermittelter Koeffizient ist jedoch anfälliger für Ungenauigkeiten, wenn eine Übertragung in andere Umgebungen erfolgt.

Der transpirations- oder wasserbasierte Ansatz beruht auf der Annahme, dass die Biomassebildung eines Pflanzenbestandes etwa linear proportional zu der jeweils transpirierten Wassermenge verläuft und sich dieses Verhältnis, ähnlich wie bei der RUE, durch einen WP (*water productivity*) Parameter ausdrücken lässt.

Die Beziehung der Ertragshöhe zur verdunsteten Wassermenge wurde durch verschiedene Autoren herausgestellt (de Wit, 1958), (Sinclair & Bennet, 1984), (Steduto, et al., 2009).

Im folgenden Teil des Kapitels werden nun einige der bekanntesten Pflanzenmodelle vorgestellt und jeweils einer der drei oben genannten Gruppen zugeordnet. Diese Übersicht soll dazu dienen,

Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der verschiedenen Pflanzenmodelle deutlich zu machen und die Einordnung des Modells BioSTAR zur ermöglichen.

2.1 Gruppe 1 – Kohlenstoffbasierter Ansatz

Die Wageningen Schule von de Wit

Die Entwicklung von Pflanzenmodellen an der *Landbouwniversiteit Wageningen*, also der Agrartechnischen Universität Wageningen, hat ihre Anfänge in den 1960er Jahren.

Den ersten von dort stammenden Pflanzenmodellen liegt der Kohlenstoffansatz für die Modellierung von Pflanzenwachstum zugrunde. Die frühen Wageningen Modelle, so z.B. ELCROS, BACROS (Vegetationsperiode) und PHOTON (Tagesschritte und Transpiration) waren eher forschungs- als anwendungsorientiert und werden als sog. *comprehensive models (cm)* bezeichnet. *Comprehensive models* besitzen eine hohe Komplexität und sind für potentielle Anwender (Landwirte, Landschaftsplaner, Entscheidungshilfe-Tools) eher ungeeignet.

Durch die Erkenntnisse, die aus den *cm* gewonnen wurden, konnten nun später sog. *summary models (sm)*, also zusammengefasste Modelle von Modellen entwickelt werden (Bouman, et al., 1996).

Die nächste Weiterentwicklung der Modelle bestand darin, dass neben dem potenziellen Wachstum ohne Wasser- oder Nährstoffbegrenzung auch die Produktionsebenen 2 und 3 (siehe unten) modellierbar gemacht wurden. Beispiele hierfür sind ARID CROP und SUCROS, wobei SUCROS das erste *sm* aus Wageningen darstellte (Bouman, et al., 1996). SUCROS, als allgemeines Pflanzenmodell, diente dann quasi als Basis für fast alle neueren in Wageningen entwickelten Pflanzenmodelle. Weitere Modelle, die aus SUCROS heraus entwickelt wurden, sind z.B. INTERCOM, welches für die Modellierung der Konkurrenz zwischen Nutzpflanze und Unkräutern (Kropff & van Laar, 1993) entwickelt wurde, sowie das Modell WOFOST (WOrld FOod STudies). WOFOST ist ein *summary model* mit dem Modellierungsschwerpunkt im Bereich der nationalen oder regionalen Planung. Obwohl das Modell in allen Anbausituationen einsetzbar ist, wurde es in erster Linie für die Simulation der tropischen Landwirtschaft entwickelt (van Diepen, et al., 1989).

WOFOST simuliert auf den Produktionsebenen (PE) 1 bis 3 (1 = ohne Wasser- und Nährstoffmangel, 2 = mit Wassermangel, 3 = mit Wasser- und Nährstoffmangel), benutzt nur zwei Bodenschichten (Wurzelzone und darunter liegende Schicht) für die PE 2 bis 3 und verwendet 49 Pflanzen-Input-Parameter (Todorovic, et al., 2009).

2.2 Gruppe 2 – Strahlungsbasierter Ansatz

LINTUL

LINTUL (Light Interception and Utilization) stellt die erste Wageninger Abweichung vom kohlenstoffbasierten Ansatz dar. LINTUL verfolgt für die Trockensubstanzbildung den Monteith-Ansatz (Monteith, 1977), bei dem ein einziger Koeffizient, die RUE, für die Darstellung der Fotosyntheseleistung und den Biomassezuwachs herangezogen wird (s.o.). Aufgrund der stark verringerten Eingangsparameteranzahl konnte das Modell LINTUL nun z.B. für weltweite Ertragsvorhersagen für das Jahr 2040 mit und ohne Wassermangel herangezogen werden (Bouman, et al., 1996).

Die CERES Modelle

Die Entwicklung der CERES (Crop Environment REsources Synthesis) Modelle begann im Jahr 1977 mit einer Anfrage des USDA-Agricultural Research Service, wie die zu erwartenden Weizenerträge der USA besser vorhergesagt werden könnten (Ritchie, 2012).

Der Ansatz der CERES Modellierung liegt, wie auch beim Wageninger LINTUL Modell, in der Verwendung der RUE für die Assimilationsleistung eines Pflanzenbestandes. Bei der Entwicklung des CERES-Weizenmodells (später kamen dann noch Modelle für Mais, Reis, Gerste, Hirse und Sorghum hinzu) wurde der Darstellung der LAI-Kurve eine starke Bedeutung beigemessen. Im CERES-Modell wird über das Erscheinen neuer Blätter sowie deren Größe und schließlich in der generativen Phase deren Absterben, die Entwicklung des Bestandes gesteuert. Die zentrale Steuerungsgröße ist hierbei die akkumulierte Temperatursumme über einer Basistemperatur von Aussaat bis Ernte.

Der aus der Entwicklung des Bestandes abgeleitete LAI-Wert beeinflusst als Maß der Strahlungsinterzeption direkt die Strahlungsausnutzung und somit die Biomassebildung der Pflanzen. Wie auch bei den Modellen der Wageninger Schule wird im CERES-Modell die Biomasseakkumulation im Zeitverlauf aufsummiert sowie die Verteilung der Assimilate auf die verschiedenen Pflanzenorgane über Funktionen gesteuert. Genauso werden wie bei anderen Pflanzenmodellen in CERES eine Bodenwasserbilanzierung durchgeführt und die Größen der Transpiration und der Evaporation fortlaufend berechnet (Ritchie, 2012). Die CERES-Modelle sowie das Modell CROPGRO sind heute modularer Bestandteil des DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) und dessen Weiterentwicklung, dem DSSAT-CSM (Cropping System Model) (Jones, et al., 2003).

DSSAT – CSM (CROPGRO)

The DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer – Crop Simulation Model) wird seit 1989 weltweit für Forschungszwecke verwendet (Jones, et al., 2003). Frühere Versionen von DSSAT bestanden aus verschiedenen Softwarepaketen, die zusammen als Einheit funktionierten und verschiedene Pflanzenmodelle als Kernstück hatten.

Der Nachteil der DSSAT-Software bis zur Version 3.5 war, dass jedes Pflanzenmodell auch sein eigenes Bodenmodell mitbrachte.

In den Versionen nach 3.5 wurde dies behoben, sodass das neue DSSAT-CSM (Crop Simulation Model) nun zwar noch einen modularen Aufbau hat, jedoch alle Module auf ein Bodenmodell zurückgreifen (Jones, et al., 2003).

Das neue DSSAT-CSM enthält Modelle für insgesamt 16 verschiedene Kulturen, welche aus den alten DSSAT CROPGRO und CERES Modellen stammen. Aufgrund der Herkunft der Pflanzenmodelle aus zwei verschiedenen Modellierungsansätzen - CERES ist strahlungsbasiert und CROPGRO ist kohlenstoffbasiert - bleiben diese Eigenschaften selbstverständlich im DSSAT-CSM erhalten.

Die Hauptaufgaben des DSSAT-CSM sind die Modellierung von standortabhängigen Erträgen in Monokulturanbausystemen mit vorgegebenem oder simuliertem Wetter- und Bewirtschaftungsinput sowie die Nachbildung von Stoffflüssen (C, N, P) im SPAC (soil plant atmosphere continuum).

Für die Durchführung einer Simulation benötigt das DSSAT Standardwerte des Klimas (Temperatur, Niederschlag, Strahlung) sowie relativ differenzierte Bodeninformationen (Bodentyp, Hangneigung, Aluminiumsättigung, C-Org.-Gehalt sowie pH-Wert des Wassers). Eine Neuauflage der Software (DSSAT v4.5) wurde im Herbst 2011 herausgegeben.

APSIM

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) ist ein Software-Produkt aus Australien zur Nutzpflanzensimulation. Es hat einen ausgeprägten modularen Aufbau (Jones, et al., 2001)

und mit der derzeitigen Version (7.0) lassen sich mehr als 20 verschiedene Kulturen (im Agrar- und Forstbereich) modellieren.

Die Nutzfunktionen von APSIM sind weit gestreut und beinhalten z.B. die Anwendung als Entscheidungshilfe-Tool für landwirtschaftliche Betriebe, Erfassung der Qualität von saisonalen Wettervorhersagen, Analyse von Versorgungsketten im Agrarbereich, Entwicklung von Agrar-Abfallverwertungsrichtlinien, Risikoermittlung für Entscheidungsträger sowie im Bereich von Forschung und Lehre (Keating, 2000).

Die APSIM-Simulationssoftware ist komplex und lässt den Benutzer eine Vielzahl von Bewirtschaftungsoptionen und Einstellungen zur Nährstoffversorgung selber setzen. Hierzu zählt z. B.

die Differenzierung von Stickstoffdünger nach NO_3 und NH_4 sowie deren Gehalte in den einzelnen Bodenschichten.

Multiple Simulationen lassen sich in APSIM durch das Hintereinanderhängen von Einzelsimulationen im Simulationsbaum der Benutzeroberfläche durchführen.

EPIC

Die Entwicklung des EPIC-Modells (Erosion-Productivity Impact Calculator) ist aus dem Bedarf heraus entstanden, langjährige Bodenabtrags- und Bodenfruchtbarkeitsveränderungen unter verschiedenen Nutzungen mathematisch zu simulieren und zu erfassen (Jones, et al., 1991). Die vom Modell verrechneten Eingangsparameter sind: Wetter, Hydrologie, Nährstoffkreisläufe, Bodenparameter sowie die Bewirtschaftung.

EPIC und dessen Folgeversionen greifen für die Berechnung der Biomasseakkumulation auf den RUE-Ansatz zurück und sind so ausgelegt, dass verschiedene Ackerkulturen (Weizen, Mais, Sorghum, Sonnenblume, Soja) und mehrjährige Fruchtfolgen modelliert werden können (Cabelguenne, et al., 1999).

Easterling et al. (Easterling, et al., 1992) haben mittels Statistik- und Erntedaten für einzelne Farmen mit EPIC den Einfluss von Klimawandel und atmosphärischem CO_2 -Gehalt auf die Produktivität von Agrarkulturen simuliert.

2.3 Gruppe 3 – transpirations- oder wasserbasierter Ansatz

AquaCrop

Das FAO-Modell „AquaCrop“ ist ein relativ neues Modell (Steduto, et al., 2009), das für die Simulation der Biomassebildung das Verhältnis von transpirierter Wassermenge zu gebildeter Biomasse, die sog. *water productivity* (WP), verwendet. AquaCrop eignet sich aufgrund seines Wasserproduktivitätsansatzes insbesondere für Pflanzensimulationen in ariden und semiariden Gebieten, kann aber ebenso in humiden Anbaugebieten verwendet werden.

Im Vergleich zu den in Gruppe eins und zwei beschriebenen Modellen hat AquaCrop einen vergleichsweise einfachen Aufbau und benötigt weniger Inputparameter, um eine Simulation durchzuführen (33). AquaCrop berücksichtigt z. B. keine Stickstoffeingabeparameter und die Simulations-Software hat eine übersichtliche, auf das notwendigste beschränkte Benutzeroberfläche, welche sich auch für nichtwissenschaftliche Nutzer leicht erschließt (Anwenderorientierung).

CropSyst

Das Modell „CropSyst“ (Stöckle, et al., 2003) funktioniert mit zwei Wachstumsmotoren (siehe unten), von denen einer strahlungsbasiert ist (RUE-Ansatz) und der zweite mit dem WP-Ansatz die Biomasseakkumulation eines Bestandes berechnet (Steduto, 2012).

CropSyst ist eine vergleichsweise komplexe Modellierungs-Software, die je nach Genauigkeitsanspruch und Verfügbarkeit für eine Simulation eine Vielzahl von Eingabeparametern erfordert. Hierzu zählen u. a. genaue Kenntnisse der Bodenverhältnisse sowie Düngetermine und die Art der Stickstoffdüngung (NO_3 , NH_4).

Die CropSyst-Simulationssoftware beinhaltet neben dem eigentlichen Pflanzenmodell noch einen Klimagenerator (ClimGen) und eine Datenschnittstelle für GIS-Systeme (Arc-CropSyst Coöperator. Mit dem ClimGen-Werkzeug lassen sich, ausgehend von einem real existierenden Klimadatenatz eines Ortes oder einer Region, Klimadaten für einen Zukunftszeitraum generieren.

Mit Hilfe des Arc-CropSyst Coöperator generiert die Modellierungssoftware das Dateiformat, mit dem in dem Computerprogramm „Arc View“ die Attribute der Poligone, Vektoren oder Punkte abgelegt werden. Die Verarbeitung von multiplen Flächen ist in CropSyst über die *Batch Run* Funktion gegeben.

Sowohl für CropSyst als auch für AquaCrop werdenn ASCII-Dateien verwendet, um Klima-, Boden- und Pflanzenparameter für das Modell zu hinterlegen.

3. Das Modell BioSTAR und dessen Rechenabläufe

Im folgenden Abschnitt wird ein neu entwickeltes Pflanzenmodell, das Modell „BioSTAR“ (**B**iomass **S**imulation **T**ool for **A**gricultural **R**essources) vorgestellt, dessen vergleichsweise einfacher Aufbau sowie die Software-Oberfläche auch für nicht-wissenschaftliche Benutzer schnell erschließ- und bedienbar sind. Vergleiche hierzu Abb. 3.1, die Eingabemaske und Abb. 3.2 als Ergebnisdarstellung. Das Modell wurde bei der Entwicklung einfach gehalten und ist explizit für die Ermittlung von schlagbezogenen sowie kleinmaßstäbigen Biomassepotenzialen ganzer Regionen und Landkreise entwickelt worden. Voraussetzung hierfür war u. a. eine einfach zu handhabende Hinterlegung großer Mengen an Input-Daten durch den Benutzer und die Verarbeitung von Monatsmittelwerten der Klimaparameter, ein Merkmal, das bei anderen Modellen nicht notwendigerweise gegeben ist. Auf diese Weise kann der Benutzer, je nach räumlicher Auflösung der Boden- und Klimadaten, Daten für Einzelschläge oder für große Gebiete, in denen Bodeneinheiten aggregiert worden sind, schnell und unkompliziert in der Datenbankstruktur des Programms zusammenstellen. Die Struktur ist so angelegt, dass die Boden- und Klimadaten in verschiedenen Einzeltabellen hinterlegt werden und über eine Kennziffer miteinander verknüpft werden können: Jedem Bodendatenatz wird dann ein Klimadatenatz zugeordnet. Zurzeit liegt das in „Java“ programmierte Modell als Software-Tool in der

Java-Programmierungsumgebung „Eclipse“ vor. Über eine Datenbankschnittstelle (MS-Access) wird ein einfacher und schneller Zugriff auf sehr große Mengen an Einzeldatensätzen (Klima, Boden) ermöglicht. Es können standortabhängige Ertragspotentiale für diverse Wintergetreide (Aussaat im Herbst) und Sommerungen (Kulturen, die im Frühjahr oder im Frühsommer ausgesät werden) modelliert werden. Kalibriert und validiert ist das Modell im derzeitigen Entwicklungsstand (08/2012) für Winterweizen, Wintertriticale, Winterroggen, Wintergerste, Silomais, Sonnenblume und Sorghum.

Eine erweiterte Stickstoffmodellierung sowie die Modellierung von Zuckerrüben, Raps, durchwachsener Silphie sowie für schnellwachsende Baumarten sind für den Zeitraum bis 2014 angedacht.

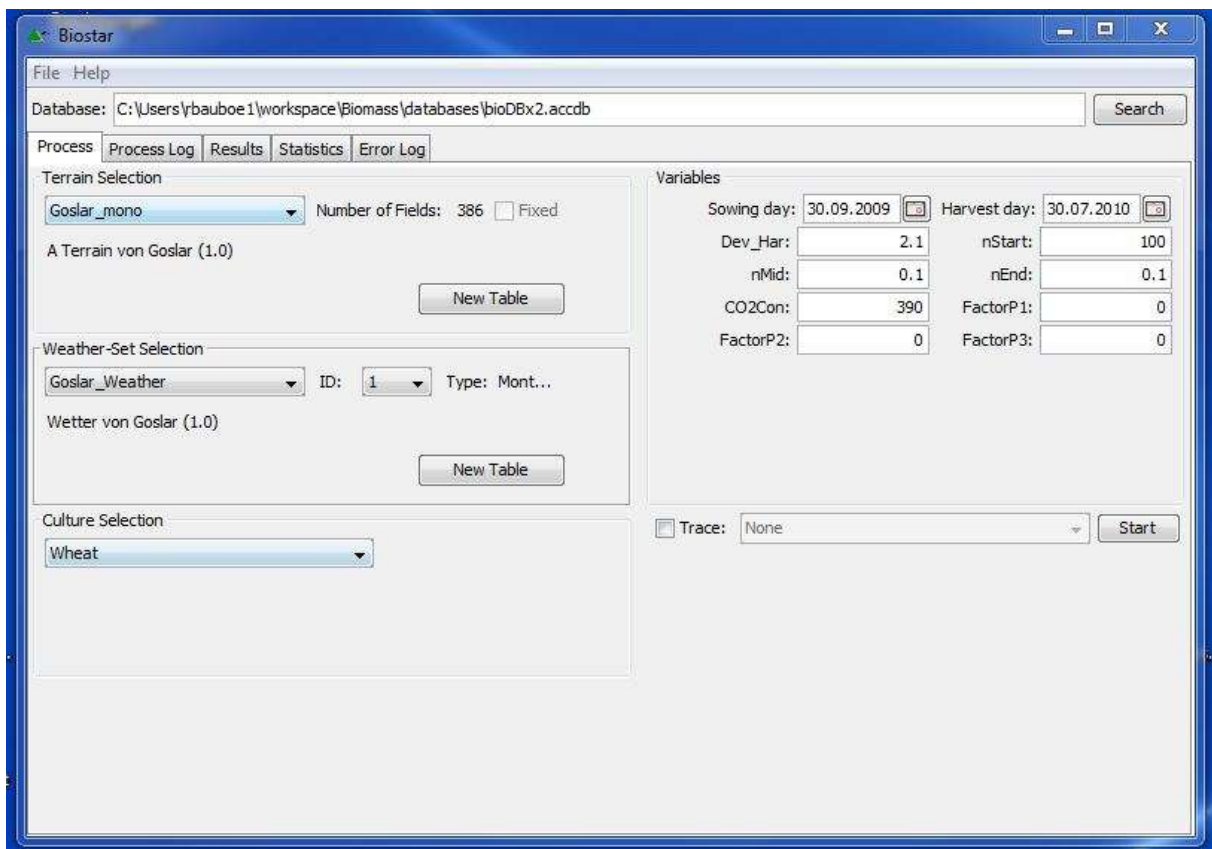


Abb. 3.1 (1): Die Eingabemaske (GUI-Process) des Modells BioSTAR

ID	RUNNUM	CREA...	PLANT...	DEVST	FELD	KULTUR	BMTOT	DMNAG	FRMASS	BEET	GRAIN	ETK	ROOT...	STORE...	HARV...
1	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125796	Maize_m	3121.861	17.84539	387.9433	0.0	0.0	259.3184	0.5716...	0.5	2010-0...
2	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125797	Maize_m	3546.102	20.05044	435.8791	0.0	0.0	260.4518	0.5654...	0.5	2010-0...
3	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125798	Maize_m	3530.129	20.08075	436.5381	0.0	0.0	259.1185	0.568839	0.5	2010-0...
4	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125799	Maize_m	3162.208	18.08227	393.0928	0.0	0.0	259.0279	0.5718...	0.5	2010-0...
5	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125803	Maize_m	2796.513	15.6312	339.8086	0.0	0.0	266.4979	0.5589...	0.5	2010-0...
6	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125804	Maize_m	3546.102	20.05044	435.8791	0.0	0.0	260.4518	0.5654...	0.5	2010-0...
7	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125806	Maize_m	3578.854	20.24231	440.0502	0.0	0.0	260.3038	0.5656...	0.5	2010-0...
8	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125807	Maize_m	3253.039	18.59083	404.1485	0.0	0.0	258.8691	0.5714...	0.5	2010-0...
9	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125808	Maize_m	3543.086	20.03421	435.5263	0.0	0.0	260.4471	0.5654...	0.5	2010-0...
10	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125809	Maize_m	3079.062	17.63181	383.3003	0.0	0.0	259.1265	0.5726...	0.5	2010-0...
11	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125815	Maize_m	3543.086	20.03421	435.5263	0.0	0.0	260.4471	0.5654...	0.5	2010-0...
12	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125831	Maize_m	3431.543	19.54325	424.8533	0.0	0.0	258.9665	0.569518	0.5	2010-0...
13	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125837	Maize_m	3471.066	19.71501	428.5871	0.0	0.0	259.627	0.5679...	0.5	2010-0...
14	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125841	Maize_m	3545.104	20.04505	435.762	0.0	0.0	260.4503	0.5654...	0.5	2010-0...
15	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125846	Maize_m	2796.513	15.6312	339.8086	0.0	0.0	266.4979	0.5589...	0.5	2010-0...
16	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125848	Maize_m	3576.458	20.22767	439.7319	0.0	0.0	260.3227	0.5655...	0.5	2010-0...
17	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125858	Maize_m	3431.543	19.54325	424.8533	0.0	0.0	258.9665	0.569518	0.5	2010-0...
18	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125862	Maize_m	3557.991	20.11513	437.2854	0.0	0.0	260.4607	0.5653...	0.5	2010-0...
19	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125863	Maize_m	3545.104	20.04505	435.762	0.0	0.0	260.4503	0.5654...	0.5	2010-0...
20	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125871	Maize_m	3121.861	17.84539	387.9433	0.0	0.0	259.3184	0.5716...	0.5	2010-0...
21	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125872	Maize_m	3582.431	20.26419	440.5259	0.0	0.0	260.275	0.5656...	0.5	2010-0...
22	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125878	Maize_m	3561.95	20.14014	437.8291	0.0	0.0	260.42	0.5654...	0.5	2010-0...
23	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125881	Maize_m	3557.991	20.11513	437.2854	0.0	0.0	260.4607	0.5653...	0.5	2010-0...
24	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125884	Maize_m	3521.748	19.9215	433.0762	0.0	0.0	260.388	0.565671	0.5	2010-0...
25	1	2012-1...	2010-0...	1.951841	125885	Maize_m	3578.854	20.24231	440.0502	0.0	0.0	260.3038	0.5656...	0.5	2010-0...

Abb. 3.1 (2): Die Ausgabemaske (GUI-Results) des Modells BioSTAR

3.1 Der Wachstumsmotor

Als Wachstumsmotor (engl. *growth engine*) wird im Folgenden der Teil eines Pflanzenmodells beschrieben, mit dessen mathematischer Formulierung die Akkumulation von Biomasse im Verlauf der Vegetationsperiode ermittelt wird.

Wie bereits im Kapitel zwei beschrieben, lässt sich zwischen kohlenstoff-, strahlungs- und wasserbasierten Wachstumsmotoren in den gängigen Pflanzenmodellen unterscheiden.

Für das Modell BioSTAR wurde ein Ansatz gewählt, bei dem ein kohlenstoffbasierter Wachstumsmotor in einem ersten Schritt die bei gegebener Globalstrahlung und Temperatur maximale CO₂-Akkumulation berechnet. Diese maximale (potentielle) CO₂-Akkumulation kann jedoch im weiteren Berechnungsverlauf durch eventuelle Einschränkungen der bodenbasierten Wasser- und Stickstoffverfügbarkeit abgesenkt werden.

Mit Gleichung 3.1.1 wird zunächst die tägliche Globalstrahlungsmenge (RJ) in den von den Pflanzen verwertbaren PAR-Anteil (engl. *photosynthetic active radiation*) und in die in den weiteren Gleichungen benötigte mmol-Einheit umgerechnet. Über die Gleichung 3.1.2 wird dann mit dem Koeffizienten *k* der vom Blattapparat eingefangene Strahlungsanteil ermittelt. In Gleichung 3.1.3 wird schließlich der PPFDI- Wert aus Gleichung 3.1.2 (aufgefangene Menge der *photosynthetic active radiation*) für die Ermittlung der Bruttofotosyntheserate (Pg) verwendet und über die Gleichung 3.1.4 für die jeweilige Umgebungstemperatur angepasst. Die PPFDI entspricht der auch im englischen Sprachgebrauch verwendeten Bezeichnung APAR (*absorbed photosynthetic active radiation*). Da für

C₃ und für C₄-Arten und auch innerhalb dieser beiden Gruppen unterschiedliche Temperaturoptima gelten, werden hier artenspezifische Gleichungen eingesetzt.

Die Fotonenflussdichte (hierbei wird ein PAR-Anteil von 50% zugrunde gelegt) Gleichung 3.1.1

$$\text{PPFD} = \text{RJ} * 23,004 / \text{L}_{\text{DAY}} / 3600 * 0,85$$

Die Lichtinterzeption Gleichung 3.1.2

$$\text{PPFDI} = \text{PPFD} * (1 - \exp^{-k * \text{BFI}})$$

Wobei:

PPFD : fotosynthetisch wirksame Photonenflussdichte in mmol pro m² und Sekunde

RJ : über dem Bestand einfallende Globalstrahlungsmenge in Joule pro cm² und Tag

L_{day} : Tageslänge in Stunden

Faktor 23,004 : Umrechnung von Joule pro cm² und Tag (global) auf mmol pro m² und Tag (PAR)

Faktor 0,85 : Korrekturfaktor für die Albedo (Rückstrahlung vom Bestand)

Faktor 3600 : Umrechnung von Stunden auf Sekunden

PPFDI : aufgefangene fotosynthetisch wirksame Photonenflussdichte in mmol pro m² und Sekunde

k : arten- und sortenspezifischer Koeffizient (abhängig vom Blattwinkel zum Boden)

BFI : Blattflächenindex (m/m²)

Die Brutto-Fotosyntheserate Gleichung 3.1.3

$$\text{P}_{\text{gross}} = \text{P}_{\text{max}} * (1 - \exp^{-\text{Qe} * \text{PPFDI} / \text{P}_{\text{max}}})$$

Wobei:

P_{gross} : Brutto-Fotosyntheserate in mmol CO₂ pro m² und Sekunde

Qe : Lichtquantennutzungseffizienz (artenspezifisch) in mmol pro mol Lichtquantum

PPFDI : aufgefangene fotosynthetisch wirksame Photonenflussdichte in mmol pro m² und Sekunde

P_{max} : maximale Fotosyntheserate (arten- und sortenspezifisch) in mmol CO₂ pro m² und Sekunde

Der Temperatureinfluss auf P_{max} (Beispiel für Triticale) Gleichung 3.1.4

$$\text{P}_{\text{max}_T} = (10^{-5} + (0,13332 * \text{T}_{\text{cel}})) * \text{P}_{\text{max}}$$

Wobei:

P_{max_T} : temperaturabhängiger P_{max}-Wert

T_{cel} : Lufttemperatur in Grad Celsius

Der atmosphärische CO₂-Einfluss auf Pmax (für C₃-Pflanzen)

Gleichung 3.1.5

$$P_{\max_{\text{CO}_2}} : P_{\max_T} * \text{Factor}_{\text{CO}_2}$$

Wobei:

P_{max_{CO₂}} : Pmax-Wert nach CO₂-Anpassung

P_{max_T} : temperaturabhängiger Pmax-Wert

Factor_{CO₂} : Anpassungsfaktor für CO₂-Gehalt in der Atmosphäre

Berechnung von Faktor_{CO₂}

Gleichung 3.1.6

$$\text{Faktor}_{\text{CO}_2} = ((\text{CO}_{2\text{neu}} - \text{CO}) / (\text{KI} + \text{CO} + \text{CO}_{2\text{neu}})) / ((\text{CO}_{2\text{alt}} - \text{CO}) / (\text{KI} + \text{CO}_{2\text{alt}} - \text{CO}))$$

Wobei:

CO_{2neu} : aktueller atmosphärischer CO₂-Gehalt in ppm

CO_{2alt} : alter atmosphärischer CO₂-Gehalt in ppm (z.B. Bezugszeitpunkt 2000)

CO : 80 – (0,036 * Strahlung) Strahlung in Joule * m² * s

KI : 220 + (0,158 * Strahlung) Strahlung in Joule * m² * s

Die Reduktion der Fotosynthese durch Stickstoffmangel wird nach Gleichung 3.1.7 (Kropff & van Laar, 1993) berechnet.

Der Faktor N

Gleichung 3.1.7

$$\text{Factor}_N = (N_{\text{act}} - N_{\text{min}}) / (N_{\text{crit}} - N_{\text{min}})$$

Wobei:

Factor_N : Stickstoffgehaltsabhängiger Korrekturwert für Pmax mit Wertebereich von 0-1

N_{act} : aktueller Stickstoffgehalt der Pflanzen in kg N pro m²

N_{min} : Minimumstickstoffgehalt der Pflanzen in kg N pro m²

N_{crit} : kritischer Stickstoffgehalt der Pflanzen in kg N pro m² unter dem Pmax sinkt

Über die Gleichung 3.1.7 wird, ausgehend vom aktuellen Stickstoffgehalt in der Pflanze, ein Faktor_N ermittelt, mit dem dann bei Stickstoffmangel die Fotosyntheseleistung abgesenkt wird (Gleichung 3.1.8). Die Werte für N_{crit} und N_{min} werden von Kropff und van Laar (1993) mit 65% und 32,5% des Maximalgehaltes bzw. 0,008 und 0,004 kg N pro kg Trockenmasse für C₃-Pflanzen und C₄-Pflanzen respektive angegeben.

Der Einfluss des Stickstoffgehaltes auf Pmax

Gleichung 3.1.8

$$P_{\max_N} = P_{\max_{CO_2}} * Factor_N$$

Wobei:

$P_{\max_{CO_2}}$: Pmax-Wert nach CO₂-Anpassung

$Factor_N$: Stickstoffgehaltsabhängiger Korrekturwert für Pmax mit Wertebereich von 0-1

Bei der Gleichung 3.1.2 handelt es sich um eine bereits Mitte des 20. Jahrhunderts durch Monsi und Saeki (1953) vom Beer-Lambert-Gesetz abgeleitete Beziehung zwischen Blattfläche, Blattstellung und der von einem Bestand eingefangenen Lichtmenge. Mit einer von Null ausgehend und stetig ansteigenden Blattfläche nimmt die zusätzlich eingefangene Lichtmenge exponentiell ab, da sich ein dichteres Blattwerk zunehmend selbst beschattet. Gardner et al. (1985) definieren für alle Kulturpflanzen, unabhängig von der Art, einen optimalen Blattflächenindex (BFI) von etwa fünf.

Begründet wird dies von Gardener damit, dass bei den meisten Kulturpflanzen mit einem BFI von fünf eine Strahlungsinterzeption von 95% erreicht wird. Er nennt diesen Punkt den kritischen BFI, also den Punkt, ab dem eine weitere Erhöhung des BFI der Pflanze (aufgrund eines sich verschlechternden Kosten-Nutzenverhältnisses) keinen weiteren Nettoassimilationsgewinn liefern würde.

Je nach Pflanzendichte (z. B. bei Reihenkulturen) kann es zu Abweichungen von den zu erwartenden *k*-Werten kommen, dies kann jedoch durch Anpassungen korrigiert werden (Flenet & J.R. Kiniry, 1996).

Die Berechnung der Brutto-Fotosyntheserate nach Gleichung 3.1.3 geht von einer exponentiell abnehmenden Lichtausnutzung durch die Pflanze mit zunehmender Beleuchtungsstärke aus (Boote & Jones, 1987) (Boote & Loomis, 1991). Im unteren Bereich dieser Kurve liegt der artenabhängige Lichtkompensationspunkt, an dem die Pflanze von der Netto-Assimilation in die Netto-Dissimilation wechselt. Der Wertebereich für die maximale CO₂-Aufnahme liegt je nach Kulturart zwischen 3 – 7 Gramm CO₂ * m⁻² * h⁻¹ oder ausgedrückt in millimol bei 0,025 – 0,06 mmol CO₂ * m⁻² Blattfläche * s⁻¹ (Penning de Vries, et al., 1989).

Die Werte für Q_e (die Initiale Quantennutzungseffizienz) liegen im Bereich von 0,04 – 0,07 mol CO₂ pro mol Lichtquanten (Ehleringer & Björkman, 1977) (Ehleringer & Pearcy, 1983).

Der Temperatureinfluss auf die Fotosyntheserate verschiedener Arten und Kulturen (in Beispielgleichung 3.1.4 als linearer Zusammenhang) ist in vielen Studien dokumentiert worden (Battaglia & Loughhead, 1996), (Berry & Björkman, 1980), (Hikosaka, 1997), (Sage & Sharkey, 1987), (Wang, et al., 1996) . Eine Liste mit tabellierten Werten für verschiedene Agrarkulturen findet sich bei Penning de Vries et al. (1989).

Mittels der Gleichungen 3.1.5 und 3.1.6 (Hoffmann, 1995) kann nun der Einfluss des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes auf die Netto-Fotosyntheserate von C_3 -Kulturen nachgebildet werden. Da C_4 -Pflanzen sich evolutionsbedingt aus sinkenden atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen ab der Kreidezeit entwickelt haben und mit ihrer PEP-Carboxylase eine hohe CO_2 -Konzentration (2000 – 2400 ppm) in den Gefäßbündelscheidenzellen aufbauen können, profitiert diese Pflanzengruppe hinsichtlich einer Fotosynthesesteigerung nicht von einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration (Ehleringer, et al., 1991). Es existiert somit keine CO_2 -Gleichung für C_4 -Pflanzen im Modell BioSTAR.

Obwohl C_4 -Pflanzen nicht direkt, also fotosynthesesteigernd von einer CO_2 -Erhöhung profitieren, reagieren sowohl C_3 als auch C_4 -Pflanzen auf eine Umgebungs- CO_2 -Erhöhung mit einer verringerten Transpiration und können somit ihre Ertragsleistung steigern (Schaller & Weigel, 2007) (Ottman, et al., 2001) (Burkart, 2011).

3. 2 Transpiration und Verhältnis von CO_2 -Umsatz zum Wasserumsatz

Im Fotosyntheseprozess sind der Austausch von CO_2 und gasförmigem H_2O (Wasserdampf) zwischen Blattwerk und Atmosphäre direkt aneinander gekoppelt, und die Kenntnis der einen Größe lässt einen Rückschluss auf die andere Größe zu.

Um CO_2 aufnehmen und Wasserdampf abgeben zu können, müssen Landpflanzen die Spaltöffnungen (Stomata) an den Blattunterseiten regulierend öffnen. Dies geschieht über den CO_2 - und den H_2O -Regelkreis und dient der Aufrechterhaltung von Drücken und Konzentrationen im Blattinneren. Die beiden Regelkreise passen somit die CO_2 - und H_2O -Gehalte des Blattes fortlaufend den äußeren Bedingungen und der Wasserverfügbarkeit an (Larcher, 2001).

Anders als in einem wasserproduktivitätsbasierten Modell, in dem aus der Transpirationsrate eine Biomasseanreicherung berechnet wird, kann in einem kohlenstoffbasierten Modell über die CO_2 -Flussmenge eine entsprechende H_2O -Flussmenge errechnet werden.

Für diese Berechnung müssen folgende Parameter bekannt sein:

1. der Wasserdampfgradient vom Blatt zur Atmosphäre
2. der CO_2 -Gradient vom Blatt zur Atmosphäre

Den ersten Parameter berechnet man mit Hilfe der Luftfeuchte (% rel.), dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck (in $\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$), der temperaturabhängigen Luftdichte (g/m^3) und den Konstanten für das Gewicht von 1 mol trockener Luft ($28,96 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) und dem Gewicht von 1 mol H_2O (18 g).

Der Sättigungsdampfdruck

Gleichung 3.2.1

$$VP_{\text{sat}} = 6,108 * \exp\left(\frac{17,62 * T}{237,3 + T}\right)$$

Wobei:

VP_{sat} : Sättigungsdampfdruck in hPa

T : Umgebungstemperatur in Grad Celsius

Die Luftdichte

Gleichung 3.2.2

$$\rho_0 = \frac{101325}{287,058 * T}$$

Wobei:

ρ_0 : Luftdichte in Gramm pro m^3

T : Temperatur in Grad Kelvin

Aus dem Sättigungsdampfdruck und der Luftfeuchte lässt sich das H_2O -Sättigungsdefizit der Luft in Gramm pro Kubikmeter ermitteln und mit der Konstante 28,96, geteilt durch die Luftdichte, das Volumen von einem mol trockener Luft (Gleichungen 3.2.3 und 3.2.4).

Sättigungsdefizit der Luft

Gleichung 3.2.3

$$VP_{\text{def}} = VP_{\text{sat}} * (1 - \text{HAIR}_{\text{fra}}) * \rho_0 / 1000$$

Wobei:

VP_{def} : Sättigungsdefizit der Luft in Gramm pro Kubikmeter

HAIR_{fra} : Luftfeuchte in Anteilen von 0-1

Aus den Ergebnissen der Gleichungen 3.2.3 und 3.2.4 kann nun der H_2O -Gradient vom Blattinneren - wo Luftfeuchtwerte von 95-99% vorherrschen (Larcher, 2001) - zur Atmosphäre berechnet werden (Gleichung 3.2.5).

Volumen von 1 mol trockener Luft

Gleichung 3.2.4

$$\text{Vol}_{\text{mol}} = 28,96 / \rho_0$$

Wobei:

Vol_{mol} : Volumen von 1 mol trockener Luft

ρ_0 : Luftdichte in Gramm pro m^3

H₂O-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre

Gleichung 3.2.5

$$H_2O_{\text{grad}} = (VP_{\text{def}} * Vol_{\text{mol}}) / 18) * 1000$$

Wobei:

H_2O_{grad} : H₂O-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in millimol pro mol

VP_{def} : Sättigungsdefizit der Luft in Gramm pro Kubikmeter

Vol_{mol} : Volumen von 1 mol trockener Luft

Faktoren 18 und 1000 : Umrechnungen von Gramm auf mol H₂O und mol in mmol

Um das Verhältnis der atmosphärischen Affinitäten für Wasserdampf und CO₂-Gas zu ermitteln, muss nun noch das CO₂-Gefälle vom Blatt zur Atmosphäre bestimmt werden (Gleichung 3.2.6). Hierfür benötigt man den atmosphärischen CO₂-Gehalt sowie den blattinternen CO₂-Gehalt. Der Wert für die Atmosphäre ist bekannt und kann im Modell vom Benutzer angepasst werden.

Der CO₂-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre

Gleichung 3.2.6

$$CO_{2\text{grad}} = (CO_{2\text{con}} - (CO_{2\text{con}} * C_i/C_a)) / 1000$$

Wobei:

$CO_{2\text{grad}}$: Der CO₂-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol

$CO_{2\text{con}}$: CO₂-Konzentration der Atmosphäre in ppm bzw. $\mu\text{mol} * \text{mol}^{-1}$

C_i/C_a : Verhältnis von internem zu externem CO₂-Gehalt (dimensionslos)

Faktor 1000 : Umrechnung von μmol in mmol

Über den blattinternen CO₂-Gehalt von Pflanzen existieren in der Literatur verschiedene, zum Teil stark auseinandergehende Angaben.

Penning de Vries et al. (1989) geben tabellierte Literaturwerte für das C_i/C_a -Verhältnis verschiedener Arten an, deren Spanne von etwa 0,2 bis 0,9 reicht.

Innerhalb einer Art soll die Schwankungsbreite laut der Autoren jedoch höchstens bei 10-20% liegen.

Aus Literaturquellen anderer Autoren lässt sich entnehmen, dass der interne CO₂-Gehalt mit einem Anstieg der Fotosyntheserate sowohl zunehmen als auch abnehmen kann (Thiagarajan & R.R.Lada, 2007), (Warren, 2007), (Thomas & Eamus, 1999), (Warren, 2006). Des Weiteren lässt sich im Verlauf der Vegetationsperiode, also mit dem Altern der Pflanzen, ein Anstieg der internen CO₂-Konzentration beobachten (Fuentes & King, 1989), (Grossman-Clarke, et al., 1999).

Nach Boote (Boote & Loomis, 1991) lässt sich der C_i -Wert rechnerisch ermitteln (Gleichung 3.2.7) und kann somit in eine Gleichung gestellt werden, in der er sowohl mit der Fotosyntheserate als auch der Blattleitfähigkeit für Wasserdampf in Beziehung gebracht wird.

Ermittlung des internen CO₂-Gehaltes

Gleichung 3.2.7

$$C_i = C_a - 1,56 * P * hPa / g_s$$

Wobei:

C_i : interner CO₂-Gehalt in parts per million

C_a : externer CO₂-Gehalt in parts per million

P : Fotosyntheserate in mikromol CO₂ pro m² pro Sekunde

hPa : Luftdruck in Hekto Pascal

g_s : Leitfähigkeit des Blattes für Wasserdampf in millimol pro m² pro Sekunde

Faktor 1,56 : Verhältnis von Diffundierbarkeit Wasserdampf zu CO₂

Im Modell BioSTAR wird der C_i – Wert an die rel. Luftfeuchtigkeit bzw. das Sättigungsdefizit der Luft gekoppelt. Dies ist insofern sinnvoll und begründbar, da sich mit steigenden Luftsättigungsdefiziten auch die Spaltöffnungen der Pflanzen verengen, um ein Austrocknen der Blätter zu verhindern. Die Verengung der Spalte führt dann zu einer Verringerung der CO₂-Aufnahme und zu einer Absenkung der blattinternen CO₂-Konzentration. Der Wertebereich für C_i wurde für das Modell bei 0,8 für C₃ und 0,55 für C₄-Pflanzen respektive angesiedelt. Multipliziert mit der relativen Luftfeuchte (ausgedrückt in Anteilen von eins), wird der Wert von C_i entsprechend abgesenkt. Die in der Literatur oft kontrastierenden C_i -Werte stammen möglicherweise von verschiedenen Luftfeuchtegehalten bei den Messungen. Durch diese Anpassung soll dies im Modell berücksichtigt werden. In Gleichung 3.2.8 kann nun aus den H₂O- und CO₂-Gradienten ein Wasser-CO₂ Verhältniswert ermittelt werden.

Der Wasser-CO₂ Verhältniswert (Wassernutzungswert)

Gleichung 3.2.8

$$Wat_{use} = (H_2O_{grad} / CO_{2grad}) * 1,56$$

Wobei:

Wat_{use} : Der Wasser-CO₂ Verhältniswert

H_2O_{grad} : H₂O_{grad} = H₂O-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol

CO_{2grad} : Der CO₂-Gradient vom Blattinneren zur Atmosphäre in mmol pro mol

1,56 : Verhältnis von Diffundierbarkeit Wasserdampf zu CO₂

Der Wasser-CO₂-Verhältniswert entspricht als Reziprokalwert dem WP-Faktor aus dem Modell AquaCrop (Steduto, et al., 2007). Im Falle des Modells AquaCrop soll aus der transpirierten Wassermenge ein Wert für die Biomassebildung abgeleitet werden und die Gleichung lautet dann:

$$WP = 1 / (CO_{2grad} / H_2O_{grad}) * 0,625 \quad \text{Gleichung 3.2.9}$$

Im Modell BioSTAR wird der Wasser-CO₂-Verhältniswert verwendet, um die CO₂-umsatzabhängige potenzielle Transpiration zu berechnen (Gleichung 3.2.10).

Die potenzielle Transpiration Gleichung 3.2.10

$$Trans_{pot} = (P_{gross} * 3600 / 1000 * L_{day} * 44 * 1000) * Wat_{use} * Evap_{LEAF}$$

Wobei:

Trans_{pot} : CO₂-umsatzabhängige, potenzielle Transpirationsrate in Litern pro Tag

P_{rate} : CO₂-Assimilationsrate aus Gleichungen 3.1.3 in millimol pro m² pro Sekunde

L_{day} : Tageslänge in Stunden

Wat_{use} : Wasser-CO₂-Verhältniswert aus Gleichung 3.2.8

Faktoren 3600, 1000, 44, 1000 : Umrechnung von Sekunde auf Tag, von millimol auf mol, von mol auf Gramm, von Gramm auf kg bzw. Liter Wasser

Evap_{LAI} : Multiplikator für luftstrombedingte Verdunstung aus Gleichung 3.3.10

Für die Berechnung der aktuellen Transpiration (Trans_{act}), also die an die Wasserverfügbarkeit angepasste Transpiration, wird im Modell BioSTAR auf das Bodenwassermodul (Abschnitt 3.3) und das Wurzelmodul (Abschnitt 3.4) zurückgegriffen.

Für die Berechnung der Bodenevaporation kann im Modell BioSTAR der strahlungs- und dampfdruckbasierten Verdunstungsansatz nach dem Penman-Monteith (Allen, et al., 1998) oder alternativ der rein strahlungsbasierte Ansatz von Turc gewählt werden.

Dies ist damit begründet, dass die Bodenevaporation in erster Linie von klimatischen Parametern:

1. einfallender Strahlungsmenge, 2. Lufttemperatur sowie 3. von der Luftfeuchtigkeit abhängt.

Berechnung der ET_0 nach Penman-Monteith-Ansatz

Gleichung 3.2.11

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T_{cel} + 273} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * U_2)} * K_c$$

Wobei:

ET_0 : Bezugs-Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag

Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve in kPa pro Grad Celsius

λ : Psychrometerkonstante in kPa pro Grad Celsius

R_n : Netto-Strahlung in MJ pro m^2 pro Tag

G : Bodenwärmestrom in MJ pro m^2 pro Tag

T_{cel} : Temperatur in 2 m Höhe in Grad Celsius

U_2 : Windgeschwindigkeit in m/s in 2 m Höhe

$e_s - e_a$: Sättigungsdefizit der Luft (Wasserdampf) in kPa

K_c : Phänologie- und kulturspezifischer Multiplikator

Berechnung der ET_0 nach Turc

Gleichung 3.2.12

$$ET_0 = 0,0031 * \left(\frac{T_{cel}}{T_{cel} + 15} * (RJ * 0,85) + 209 \right) * 1,1$$

Wobei:

ET_0 : Bezugs-Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag

T_{cel} : Temperatur in 2 m Höhe in Grad Celsius

RJ : Netto-Strahlung in Joule pro cm^2 pro Tag

Faktor 1,1 : Anpassungsfaktor für mitteleuropäischen Klimaraum

Faktor 0,85 : Albedo-Korrekturfaktor

Um aus der ET_0 einen Anteilswert für die Bodenevaporation zu errechnen, wird die Gleichung 3.2.13 nach Ritchie (Ritchie, 1972) verwendet. In der Bodenverdunstungsgleichung nach Ritchie wird, wie auch bei der Berechnung der Lichtinterzeption (Gleichung 3.1.2), die Strahlungstransmission durch das Blattwerk nach dem Beer-Lambert-Gesetz verwendet. Dieser Ansatz ist rein strahlungsbasiert.

Nach dem Beer-Lambert-Gesetz lässt sich die Abschwächung von Strahlung beim Durchgang durch ein Medium mit einer absorbierenden Substanz - welche eine bestimmte Schichtdicke oder Konzentration aufweist - anhand einer logarithmischen Funktion beschreiben. Bei einer Strahlungstransmission durch ein Blätterdach stellt die Blattfläche die absorbierende Substanz dar und der jeweilige BFI-Wert ist die Schichtdicke oder Konzentration dieser Substanz.

Die Bodenevaporation

Gleichung 3.2.13

$$\text{Evap}_{\text{soil}} = \frac{\Delta * R_n * e^{-0,6 * LAI}}{(\Delta + \gamma) * c_p}$$

Wobei:

$\text{Evap}_{\text{soil}}$: Bodenevaporationsanteil in mm pro m² pro Tag

Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve in kPa pro Grad Celsius

λ : Psychrometerkonstante in kPa pro Grad Celsius

R_n : Netto-Strahlung in MJ pro m² pro Tag

LAI : Blattflächenindexwert in m² * m⁻²

C_p : Spezifische Wärme der Luft (1033 [kJ / kg°C])

Potentielle Evapotranspiration (ET₀)

Gleichung 3.2.14

$$ET_0 = \text{Trans}_{\text{pot}} + \text{Evap}_{\text{soil}}$$

Wobei:

ET₀ : Potentielle Evapotranspiration in mm pro m² pro Tag

$\text{Evap}_{\text{soil}}$: Bodenevaporationsanteil in mm pro m² pro Tag

$\text{Trans}_{\text{pot}}$: CO₂-umsatzabhängige, potentielle Transpirationsrate in Litern pro Tag

3.3 Das Bodenwasser

Im Modell BioSTAR lassen sich bis zu 16 Bodenschichten in Dezimeterintervallen definieren.

Für jede Bodenschicht wird in der Datenbank eine Bodenart per Kürzel (drei Stellen, alphanumerisch) definiert. Im Programmcode sind derzeit (Stand 08/2012) alle Kennwerte der Bodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden, 2005) sowie die der Bodenarten der FAO-Klassifikation (Batjes, et al., 2008) hinterlegt.

3.3.1 Wasserbilanzierung

Über die Kennwerte Feldkapazität und Welkepunkt wird ein Anfangswassergehalt für jede Schicht errechnet, dem dann im Verlauf der Simulation Wasser entzogen oder hinzugefügt wird. Entzug findet entweder durch die Wurzeln, Evaporation oder durch Sickern in die nächst tiefer gelegene Bodenschicht statt.

Die tägliche Wasserbilanzierung am Beispiel der 1. Bodenschicht

Gleichungsbaum 3.3.1.1

$FC_{ini_10} = (\text{WENN } NR_{days} = 0) \text{ dann } (FC_{ini_10} = FC_{max_10}) \text{ SONST } (FC_{ini_10} = FC_{end_10_0})$

$WAT_{BAL_10} = FC_{ini_10} - (R_{xshare_10} * ET_0) + Prec_{day} + Fact_{prec}$

WENN ($WAT_{BAL_10} > FC_{max_10}$)

Dann Number = 1;

SONST ($WAT_{BAL_10} < FC_{max_10}$ UND $WAT_{BAL_10} \geq 0$)

DANN Number = 2;

SONST ($WAT_{BAL_10} < 0$)

DANN Number = 3;

Switch (Number) {

Case 1:

$FC_{end_10} = FC_{max_10}$

$Trans_{act_10} = R_{xshare_10} * ET_0$

$Leach_{10} = WAT_{BAL_10} - FC_{max_10}$

Break

Case 2:

$FC_{end_10} = WAT_{BAL_10}$

$Trans_{act_10} = R_{xshare_10} * ET_0$

$Leach_{10} = 0$

Break

Case 3:

$FC_{end_10} = FC_{ini_10} - Trans_{act_10}$

$Trans_{act_10} = R_{share} * FC_{ini_10}$

$Leach_{10} = 0$

Break

Default:

`System.out.println("Soilwater-Error")`

Wobei:

FC_{ini_10} : Anfangswassergehalt der Schicht 1 in mm pro m²

NR_{days} : Anzahl der in der Simulation verstrichenen Tage

FC_{max_10} : Feldkapazität der Schicht 1 in mm pro m²

FC_{end_10} : Endwassergehalt der Schicht 1 in mm pro m²

$FC_{end_10_0}$: Endwassergehalt der Schicht 1 in mm pro m² aus dem vorangegangenen Tag

Pre_{day} : Niederschlagsmenge in mm pro m^2 und Tag

$Fact_{prec}$: Multiplikator (Benutzereingabe) für Niederschlagsvariation

Re_{share} : Anteil einer Schicht am Gesamt-Wurzelentzugspotential (0-1)

R_{share} : Anteil einer Schicht an der Gesamtdurchwurzelung

ET_0 : potentielle Evapotranspiration in mm pro m^2 und Tag

$Leach_{10}$: Sickerwassermenge in Litern pro m^2 und Tag von Schicht 1 in Schicht 2

WENN, DANN, SONST, UND : logische Verknüpfungsoperatoren

Break : Abbruch, wenn Bedingung erfüllt ist

Number : Zählvariable für nachfolgende „Case-Anweisung“

Case : „Java Case-Anweisung“

Wassereintrag erhält die erste Bodenschicht durch Niederschlagswasser und die Schichten zwei bis 16 durch Sickerwasser von der jeweils oberhalb gelegenen Schicht.

Sickern setzt im Modell dann ein, wenn eine Bodenschicht über ihre Feldkapazität hinaus mit Wasser angefüllt wird.

Die Menge des schichtbezogenen Wasserentzugs durch das Wurzelwerk der Pflanzen wird primär über das Wurzelmodul (Kapitel 3.4) und die entsprechende Wurzellängendichte der jeweiligen Schicht bestimmt. Im Gleichungsbaum 3.3.1.1 ist die Bodenwasserbilanzierung für die erste Bodenschicht exemplarisch so dargestellt, wie sie in der Software umgesetzt ist.

Aus der für die Pflanzen und der für die Bodenverdunstung zur Verfügung stehende, extrahierbare Gesamtwassermenge (Bilanzierungsmethode) wird im Summierungsverfahren dann die aktuelle Evapotranspiration (ET_{act}) berechnet.

3.3.2 Bodensaugspannung und Wasserentzug durch die Wurzeln

Für die Berechnung der Bodensaugspannung, also des Matrixpotenzials (Ψ) der Bodenschichten, werden die für jede Bodenart (Korngrößenverteilung) in der Datenbank hinterlegte van Genuchten Parameter (Genuchten, 1980) aus der DIN-Norm (DIN-Norm-4220, 2008) in Gleichung 3.3.2.1 verwendet. Der Ausgabewert aus Gleichung 3.3.2.2 wird dann in Gleichung 3.3.3.3 verwendet, um die schichtspezifische Aufnahmekapazität der Wurzeln für Wasser zu berechnen.

Zur visuellen Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Gleichungen ist in Abbildung 3.3.2.1 ein Flussdiagramm der Prozesszusammenhänge des Modells BioSTAR abgebildet.

Die Saugspannung $h(\theta)$ aus dem van Genuchten Modell

Gleichung 3.3.2.1

(als Funktion des Wasseranteils)

$$h(\theta) = \frac{1}{\alpha} * \left(\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{n/1-n} - 1 \right)^{1/n}$$

Wobei:

$h(\theta)$: Bodensaugspannung in cm Wassersäule bzw. hPa

α : van Genuchten Parameter Alpha [cm^{-1}]

θ : Bodenwassergehalt in Vol%

θ_r : residualer Wassergehalt (permanenter Welkepunkt) in Vol%

θ_s : Sättigungswassergehalt (Feldkapazität) in Vol%

n : van Genuchten Parameter n (Maß der Porengrößenverteilung mit $n > 1$)

Anteil einer Schicht am Wurzelentzugspotential

Gleichung 3.3.2.2

$$R_{\text{share}} = RL_{\text{dens}} / RL_{\text{densTOT}}$$

Wobei:

R_{share} : Anteil einer Schicht an der Gesamtdurchwurzelung

RL_{dens} : Wurzellängendichte einer Schicht n (siehe Gleichung 3.4.3)

RL_{densTOT} : Wurzellängendichte aller Schichten

In roter Schrift sind die Eingangsparameter (Klima, Boden) dargestellt. Pfeile zeigen Beeinflussungen und Zusammenhänge an. So wird z. B. über die Temperatur die Pflanzenentwicklung, der LAI und die Wuchshöhe gesteuert. Die im Boden vorhandene Wassermenge (entziehbar für die Wurzeln) in Kombination mit der Luftfeuchte und der Strahlung steuern wiederum die Evapotranspiration. Die Fotosyntheseleistung wird von Strahlung, Temperatur und Blattfläche bestimmt.

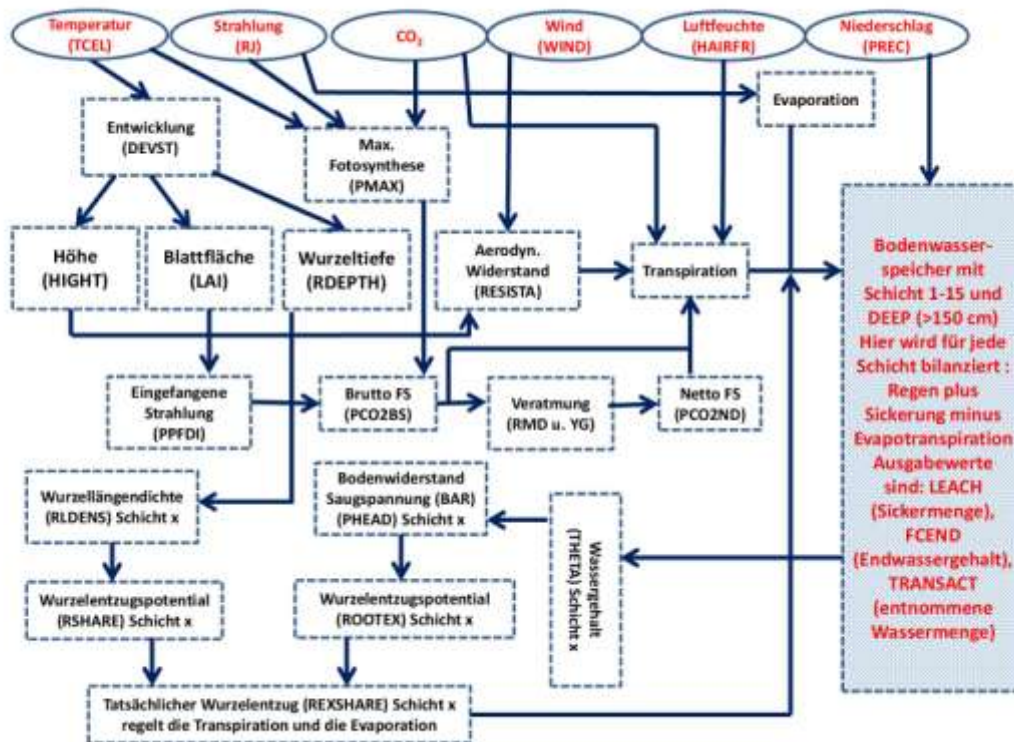


Abb. 3.3.2.1 (3): Flussdiagramm der Prozesszusammenhänge des Modells BioSTAR

In Abbildung 3.3.2.2 ist die für das Modell eigene Berechnung der potenziellen Transpirationshöhe in Abhängigkeit von der Fotosyntheseleistung näher dargestellt. Hier wird deutlich, dass der sog. USECOEF (der Nutzungskoeffizient), also der Verhältniswert zwischen CO_2 - und H_2O -Gradient, maßgeblich an der Transpirationshöhe beteiligt ist. Zusammen mit dem Multiplikator „EVAPLEAF“, der sich aus der Höhe des aerodynamischen Widerstandes ergibt, errechnet sich die potentielle Transpirationshöhe. Sie kann durch Wassermangel im Boden allerdings abgesenkt werden (siehe Abb. 3.3.2.1). Die Evaporation wird hier aus einem strahlungsbasierten Verdunstungsansatz nach Turc sowie dem Logarithmus der Strahlungsinterzeption berechnet.

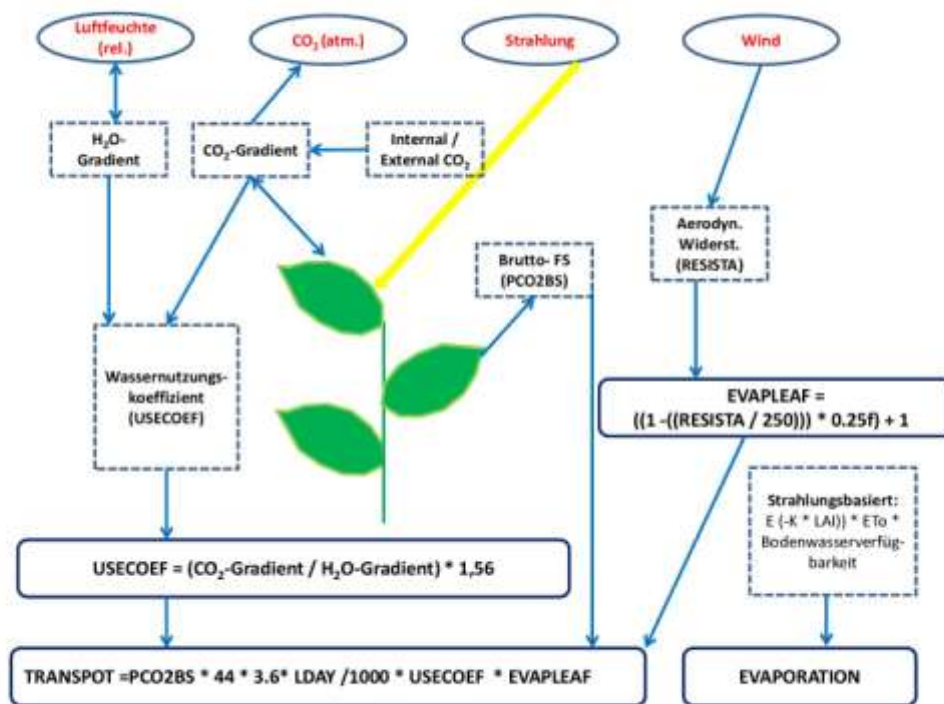


Abb. 3.3.2.2 (4): Berechnung der potenziellen Transpirationshöhe (TRANSPOT) in Abhängigkeit von der Fotosyntheseleistung

3.3.3 Der pF-Wert als Transpirations- und Fotosynthesebremse

Der Bodenwassergehalt und die Bodensaugspannung (Ψ) beeinflussen im Verlauf des Pflanzenwachstums sowohl die Transpiration als auch die Fotosyntheseleistung der Pflanzen.

Mit abnehmenden Bodenwasservorräten und einer ansteigenden Bodensaugspannung steigt auch das Potenzial in den Pflanzenzellen von den Wurzeln über die Stängel zu den Blättern hin zunehmend negativ an (Stedule, 2002). Der Potenzialunterschied von der Bodensaugspannung zu den Blättern liegt in etwa bei Faktor zwei (Hillel, 1980), hat aber eine gewisse Schwankungsbreite, da Landpflanzen über das Öffnen und Schließen der Stomata (Widerstand) ihre Wasserabgabe und somit einen Potenzialabfall regulieren können (Stedule, 2002). In Abhängigkeit von der jeweiligen Saugspannungskurve (pF-Kurve) einer Bodenart tritt der Fall eines stark negativen Potenzials bei abnehmenden Bodenwassergehalten früher oder eher verzögert ein (Sandböden vs. Tone).

Da die Bodensaugspannung das Blattwasserpotenzial und den Turgordruck in den Schließzellen beeinflusst und diese wiederum den Stomatawiderstand (R_s) regeln, lässt sich auch ein direkter Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und R_s bzw. der Transpirationshöhe feststellen (Gardener, 1960),(Steduto & Hsiao, 1998),(Zenker, 2003). Der Zusammenhang zwischen Bodensaugspannung und dem Verdunstungswiderstand kann in einer Exponentialfunktion beschrieben werden und nimmt für R_s bei pF-Werten von 1,8 (Feldkapazität) und 4,2 (Welkepunkt)

Werte zwischen 50-100 und 1000 Sekunden pro Meter an (Zenker, 2003). Der Reziprokwert zu R_s ist die Leitfähigkeit der Stomata (engl. *stomatal conductance*). Diese Leitfähigkeit für Wasserdampf lässt sich als Wert in zurückgelegter Strecke pro Zeiteinheit ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) oder in verdunsteter Wassermenge pro Zeiteinheit und Fläche ausdrücken ($\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

Die Umrechnung von $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ in $\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ erfolgt nach Gleichung 3.3.3.1

Umrechnung des Leitfähigkeitswertes

Gleichung 3.3.3.1

$$\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 590 \cdot 18 \cdot 1000$$

Wobei:

Faktor 590 : Gewicht von 1 m^3 Wasserdampf in Gramm

Faktor 18 : Molmasse von Wasser

Faktor 1000 : Umrechnung von mol auf millimol

Bei einer Temperatur von 15 Grad Celsius und einem mittleren atmosphärischen Luftdruck entspricht ein hoher Leitfähigkeitswert ($300 \text{ mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) in etwa einem R_s -Wert von $100 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ($10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) und ein niedriger Leitfähigkeitswert ($30 \text{ mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) in etwa einem R_s -Wert von $1000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ($1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Untersuchungen anderer Autoren zum Zusammenhang von Bodenwassergehalt, Verdunstungswiderstand und Stomataleitfähigkeit haben ähnliche Wertebereiche und Zusammenhänge aufgezeigt (Irvine, et al., 1998), (Boyer, 1970a), (Lynn & Carlson, 1990), (Kim & Verma, 1991), (Thomas & Eamus, 1999), (Choudhury, 1985), (Sionit & Kramer, 1976).

Da eine Öffnung oder Verengung der Schließzellen sowohl die Transpiration als auch die CO_2 -Atmung reguliert (siehe Abschnitt 3.2), lassen sich aus Bodenwassergehalt, dem R_s -Wert oder der stomatären Leitfähigkeit auch Zusammenhänge dieser drei Faktoren mit dem CO_2 -Umsatz ableiten und durch Untersuchungen belegen (Sung & Krieg, 1979), (Siddique, et al., 2000), (Jones, 2007), (Fuentes & King, 1989), (Steduto & Hsiao, 1998), (Jacobs, et al., 1996). Im Modell BioSTAR wird für die Berechnung der reduzierten Fotosyntheseleistung (verengte Spaltöffnungen) eine lineare, an die Transpiration gekoppelte Beziehung angenommen (aktuelle Transpiration / potenzielle Transpiration).

Für die Berechnung des Verdunstungswiderstandes (R_s) wird direkt aus der Bodensaugspannung mittels einer Polynomfunktion ein Wert für die relative Öffnungsweite der Stomata berechnet (Gleichung 3.3.3.2) (Zenker, 2003). Je nach Bodenwassergehalt und pF-Wert liegt die Ausgabe dieser Funktion zwischen 0 ($\Psi = 16 \text{ MPa}^{-1}$) und 1 ($\Psi = 0,01 \text{ MPa}^{-1}$). Der Ausgabewert dieser Funktion ersetzt

den Stomatawiderstand für die Diffusion von Wasserdampf mit $R_s \approx 50 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ für voll geöffnete Spaltöffnungen und $R_s \approx 1000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ für voll verengte Spaltöffnungen.

In Gleichung 3.3.3.3 wird dann der Ausgabewert dieser Funktion mit dem anteiligen, für jede Bodenschicht berechneten Wert für die Wasseraufnahmekapazität der Wurzeln in dieser Schicht multipliziert.

Relativer Verdunstungswiderstand der Stomata (R_s)

Gleichung 3.3.3.2

$$R_s = -4 \cdot E^{-09} \cdot \Psi^2 - 3 \cdot E^{-06} \cdot \Psi + 0,9989$$

Wobei:

R_s : relativer Verdunstungswiderstand der Stomata mit: 1 = $50 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ und 0 = $1000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$

Ψ : Bodensaugspannung in MPa^{-1}

Schichtspezifische Aufnahmekapazität der Wurzeln für Wasser

Gleichung 3.3.3.3

$$REX_{\text{share}} = R_s \cdot R_{\text{share}}$$

Wobei:

REX_{share} : wassergehaltsabhängige Wasseraufnahmekapazität der Wurzeln in einer Bodenschicht

R_s : relativer Verdunstungswiderstand der Stomata mit: 1 = $50 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ und 0 = $1000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$

R_{share} : relativer, potenzieller Anteil einer Bodenschicht an der Wasseraufnahme der Wurzeln in dieser Schicht (Gleichung 3.3.3.2)

3.3.4 Der aerodynamische Verdunstungswiderstand (R_a)

Ein weiterer Widerstand im System Boden-Pflanze-Atmosphäre ist der aerodynamische Widerstand. Er tritt an der Grenzschicht von der Pflanze zur Umgebungsluft auf und kann, je nach Windgeschwindigkeit und Bestandeshöhe, so gering sein, dass er bei der Verdunstungsberechnung kaum eine Rolle spielt. Bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten (unter $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) und noch jungen, niedrigen Beständen kann dieser Widerstand jedoch sehr groß werden ($> 1000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) und sogar den Stomatawiderstand übertreffen. Für das Modell wird ein mittleres Verhältnis des maximalen Stomatawiderstands zum aerodynamischen Widerstand von 1000 zu 250 angenommen. Über dieses Verhältnis wird in Gleichung 3.3.3.5 ein Multiplikator errechnet, mit dem eine luftströmungsbedingte zusätzliche Abtrocknung der Blätter simuliert wird. Dieser Multiplikator kann, je nach Ausgabewert von Gleichung 3.3.3.5, zwischen 1 ($r_a = 250 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) und 1,25 ($r_a = 0 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$) schwanken.

Im Modell wird der aerodynamische Verdunstungswiderstand mit einer Linearfunktion auf einen Wert von 0 bis 1 gebracht und dann als Multiplikator für die ET_0 verwendet. Die Berechnung des Widerstandes erfolgt nach Gleichung 3.3.3.4 (Allen, et al., 1998).

Aerodynamischer Verdunstungswiderstand

Gleichung 3.3.3.4

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z}$$

Wobei:

 r_a : aerodynamischer Widerstand in Sekunden pro Meter z_m : Höhe der Windmessung in Metern (Bestandeshöhe) z_h : Höhe der Feuchtigkeitsmessung in Metern (Bestandeshöhe) d : Nullebene des Versatzes in Metern ($\approx 2/3$ * Bestandeshöhe) z_{om} : Rauigkeitslänge für Bewegungsübertragung in Metern ($\approx 0,123$ * Bestandeshöhe) z_{oh} : Rauigkeitslänge für Wärme- und Dampfübertragung in Metern ($= 0,1$ * z_{om}) k : von Karmansche Konstante ($= 0,41$) u_z : Windgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde**Anpassungsfaktor $Evap_{leaf}$ für die potenzielle Transpiration**

Gleichung 3.3.3.5

$$EVAP_{LEAF} = ((1 - (r_a / 250))) * 0,25) + 1$$

Wobei:

 $Evap_{LEAF}$: Multiplikator für Fotosynthesebedingte Blatttranspiration r_a : aerodynamischer Widerstand in Sekunden pro MeterFaktor 250 : als maximal angenommener aerodynamischer Widerstand in $m * s^{-1}$ Faktor 0,25 : mittleres Verhältnis von r_a zu r_s **3.4 Die Durchwurzelung des Bodens**

Die Wurzelbiomasse von Ackerkulturen und ihr Anteil an der Gesamtbiomasse lassen sich nur mit größerem Aufwand ermitteln (Ehlers, 1996) und stellen für die Pflanzenmodellierung aufgrund von Unsicherheitsfaktoren (Übertragbarkeit von Messwerten) eine Herausforderung dar. Verschiedene Untersuchungen zum Anteil der unterirdischen Biomasse von Ackerkulturen haben gezeigt, dass unter normalen Wachstumsverhältnissen der Wurzelbiomassenanteil von der Aussaat bis zur Blüte stetig abnimmt und dann bis zur Reife in einem Bereich von etwa 10-40% an der Gesamtbiomasse liegt (Gallagher & Biscoe, 1978), (Kahle, et al., 2001), (Koshkin, et al., 1987), (Miller, et al., 1988), (Siddique, et al., 1990), (Russel, 1977), (Rajala & Peltonen-Sainio, 2001), aber aufgrund von Unterschieden in den Messmethoden und den Versuchen allgemein eine breite Streuung aufweisen kann (Amos & Walters, 2006).

Stickstoffmangel führt, ebenso wie Wassermangel, zu einer Ausweitung des Wurzel/Spross-Verhältnisses (Shangguan, et al., 2004), (Hossain, et al., 2008), (Yamaguchi & Sharp, 2010), (Younis, et al., 2000).

Im Modell BioSTAR ist zunächst einmal die Durchwurzelungstiefe wichtig, denn diese spielt für die Wasserextraktion eine wichtige Rolle (siehe oben).

Als maximale Durchwurzelungstiefe wird ein Wert angenommen, der vom Bodenprofil und nicht von der Art selber abhängt. Dies ist damit begründet, dass die maximale Wurzeltiefe von Ackerkulturen durchaus bis über 200 cm gehen kann, eine so tiefe Durchwurzelbarkeit aber durch geringmächtige Bodenprofile nicht notwendigerweise von der Bodenseite her gegeben ist. Wenn von der Bodenseite her keine Durchwurzelungsbremse gegeben ist, dann greift im Modell der für jede Kultur festgelegte Wert der kulturbedingten maximalen Wurzeltiefe, die CRD_max.

Die Entwicklung der Wurzeltiefe wird im Modell BioSTAR über die eigentliche Pflanzenentwicklung gesteuert (Kapitel 3.6) und nimmt einen maximalen Wert an, der bei einem Entwicklungsstadium von 1, also in etwa zur maximalen BFI-Entwicklung erreicht wird. Die Gleichung hierfür lautet:

Die maximale Durchwurzelungstiefe Gleichung 3.4.1

$R_{\text{depthmax}} = \text{WENN } CRD_max < R_{\text{depthmax}}$

$\text{DANN } R_{\text{depthmax}} = CRD_MAX$

$\text{SONST } R_{\text{depthmax}} = R_{\text{depthmax}}$

Die aktuelle Durchwurzelungstiefe Gleichung 3.4.2

$R_{\text{depth}} = Dev_{\text{st}} / (1 / CRD_max)$

Sollte $R_{\text{depth}} \geq R_{\text{depthmax}}$ sein (also mit $Dev_{\text{st}} \geq 1$), dann ist $R_{\text{depth}} = R_{\text{depthmax}}$

Wobei:

R_{depth} : aktuelle Durchwurzelungstiefe in cm

R_{depthmax} : maximale Durchwurzelungstiefe in cm

CRD_max : crop root depth (kulturbedingte maximale Wurzeltiefe) in cm

Dev_{st} : Entwicklungsstadium mit Wertebereich 0 – 2,1 (dimensionslos)

Für weitere Berechnungen im Modell wird dann über eine *if-Abfrage* (Java Syntax) festgestellt, ob eine Schicht durchwurzelt ist und der Wert der Abfrage (0 / 1) einer Variablen (R_{yn}) zugewiesen.

Um den Einfluss von Wasserstress in der vegetativen Phase und somit in der Wurzelbildungsphase zu simulieren, wird im Modell BioSTAR eine Funktion verwendet, die in Abhängigkeit vom

Bodenwassergehalt die Wurzelbildung vor dem BFI-max (Entwicklungsstadium ≤ 1) beschleunigt (Gleichung 3.4.3).

Beschleuniger für Wurzelwachstum

Gleichung 3.4.3

$$\text{Root}_{\text{accel}} = 0,999 + (0,0667 * \Psi_s)$$

Wobei:

$\text{Root}_{\text{accel}}$: Beschleunigungsfaktor für Wurzelausdehnung

Ψ_s = Bodensaugspannung in MPa^{-1}

Im Wertebereich von $\leq 0,1 \text{ MPa}^{-1}$ liegt der Faktor bei eins. Mit zunehmendem Trockenstress steigt der Faktor linear an und erreicht bei 15 MPa^{-1} seinen Maximalwert von zwei.

Mit diesem Multiplikator wird also im Modell simuliert, dass Pflanzen, die in der vegetativen Phase unter Trockenstress leiden, auf Kosten der oberirdischen Biomasse ein großes Wurzelwerk ausbilden. Ein wichtiger Faktor für die Berechnung der Wasseraufnahmekapazität (Gleichung 3.3.3.3) ist im Modell BioSTAR die Wurzellängendichte in den durchwurzelteten Bodenschichten. Die Wurzellängendichte wird in cm Wurzellänge pro cm^3 Boden angegeben und kann, je nach Bodentiefe, Entwicklungsstand und Kulturart, Werte von etwa 1 cm pro cm^3 bis 20 cm pro cm^3 annehmen.

Die Form der Wurzelbiomassenverteilung lässt sich, geometrisch ausgedrückt, am besten als ein sich nach unten verzügender Kegel beschreiben.

In den Bodenschichten bis etwa 50 cm Tiefe finden sich bei annualen Ackerkulturen die höchsten Durchwurzelungsdichten (Pietola & L.Alakukku, 2005), (Gäth, et al., 1989), (Amaducci, et al., 2008). Sie liegen im Mittel bei etwa 10 cm pro cm^3 in den oberen 10 cm und nehmen dann bis 50 cm Tiefe auf etwa 1 cm pro cm^3 ab.

Anmerkend muss hier gesagt werden, dass jede Kultur ihre eigene, vom Idealschema abweichende Durchwurzelungsform aufweist (Ehlers, 1996), und somit in einem einfach gehaltenen Modell die Wurzellängendichte nur näherungsweise beschrieben werden kann.

Für das Modell BioSTAR wird von einer vereinfachten Idealverteilung ausgegangen, in dem im ersten Dezimeter und bei voll ausgebildetem Wurzelwerk, 9,375 cm pro cm^3 Wurzellängendichte erreicht werden, in 50 cm Tiefe noch 4,375 cm pro cm^3 , und sich die Wurzeln dann ab 100 cm Tiefe stark ausdünnen (0,775 cm pro cm^3).

In Gleichung 3.4.4 ist die Berechnung für die Wurzellängendichte anhand der obersten Bodenschicht (0-10 cm) exemplarisch dargestellt.

Die Wurzellängendichte für Schicht 1 (0-10 dm)

Gleichung 3.4.4

$$RL_{dens_10} = 9,375 * (R_{depth} / R_{depthmax}) * R_{yn_10}$$

Wobei:

RL_{dens_10} : Wurzellängendichte in Schicht 0-10 cm

R_{depth} : aktuelle Durchwurzelungstiefe in cm

$R_{depthmax}$: maximale Durchwurzelungstiefe in cm

R_{yn_10} : Multiplikator für die Abfrage: Ist Schicht 0-10 cm durchwurzelt? $y=1$; $n=0$

Um die Anzahl der durchwurzelten Schichten für andere Gleichungen bereitzustellen, wird in Gleichung 3.3.5 vom Modulo-Operator Gebrauch gemacht. Der Modulo-Operator wird in den C-Sprachen und in Java für die Ermittlung des Divisionsrestes einer Teilung verwendet (ist hier notwendig, da die Wurzeltiefe im Modell in cm vorliegt).

Anzahl der durchwurzelten Schichten

Gleichung 3.4.5

$$NO_{ri} = (R_{depth} - (R_{depth} \% 10)) / 10$$

Wobei:

NO_{ri} : Anzahl der durchwurzelten Schichten

R_{depth} : aktuelle Durchwurzelungstiefe in cm

$R_{depth} \% 10$: Divisionsrest der Teilung von R_{depth} durch 10

3.5 Der Stickstoffhaushalt in Boden und Pflanze

Zum gegenwärtigen Entwicklungsstand (08/2012) des Modells können Stickstoffströme vom Boden zur Pflanze, die N-Mineralisationsrate im Boden sowie der Stickstoffeinfluss auf die Fotosynthesekapazität (siehe Gleichung 3.1.8) der Pflanzen modelliert werden.

3.5.1 Die N-Nettomineralisation

Für die Modellierung der N-Mineralisationsraten wird zwischen der Mineralisation aus frischen Ernterückständen (N_{fast}) und 'älterer', weitgehend humifizierter organischer Substanz (N_{slow}) unterschieden (Gleichung 3.5.1.1, Abbildung 3.5.1.1) (Kersebaum, 1995) (Heumann & Böttcher, 2004). Für die Beschreibung der Abhängigkeit der N-Mineralisation von Temperatur und Boden werden im Modell Funktionen aus dem Verbundprojekt „Neue internetgestützte Wege zur Optimierung der N-Düngeberatung“ (Böttcher & Heumann, 2008) verwendet. Nach den Funktionen von Böttcher (2008) kann zwischen drei verschiedenen Bodentypen bei der Mineralisationsrate unterschieden werden. Typ A sind die typischen Lössböden, Typ B sind die podsolierten oder vergleyten Sandböden mit hohen Humusgehalten und Typ C sind Sand- und Lehmböden mit niedrigen Humusgehalten (Abbildungen 3.5.1.2 und 3.5.1.3 und Gleichungen 3.5.1.2 – 3.5.1.6).

Für die Berechnung der wassergehaltsabhängigen Mineralisationsreduktion wird ebenfalls eine Funktion aus Böttcher und Heumann (2008) verwendet (Abb. 3.5.1.4 und Gleichung 3.5.1.7).

Kumulative N-Nettomineralisation aus N_{fast} und N_{slow}

Gleichung 3.5.1.1

$$N_{min}(t) = N_{fast} [1 - \exp(-k_{fast} * t)] + N_{slow} [1 - \exp(-k_{slow} * t)]$$

Wobei:

$N_{min}(t)$: aus N_{fast} und N_{slow} zusammengesetzte N-Mineralisationsrate in kg pro ha und Tag

k_{fast} : temperaturabhängiger N-Mineralisationswert (schnell mineralisierbar) in kg pro ha pro Tag

k_{slow} : temperaturabhängiger N-Mineralisationswert (langsam mineralisierbar) in kg pro ha pro Tag

t = Gesamttage

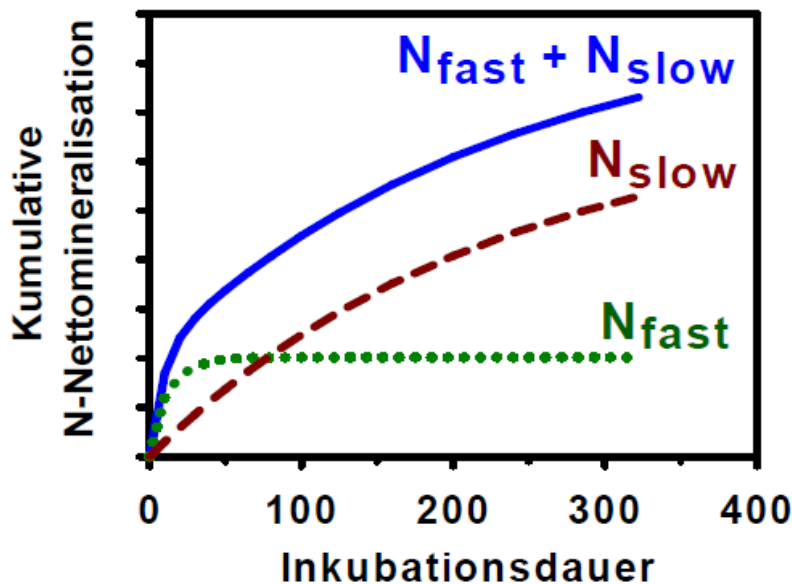


Abb. 3.5.1.1 (5): Kumulative N-Nettomineralisation aufgelöst nach N_{fast} und N_{slow} sowie Inkubationsdauer.

Quelle: Böttcher & Heumann, 2008

N-Mineralisation für Bodentypen A und B (K_{fast}) - Temperaturfunktion

Gleichung 3.5.1.2

$$K_{fast} = 0,0007 - 0,0002 * T_{cel} + 4 * 10^{-5} * T_{cel}^2$$

N-Mineralisation für Bodentyp C (K_{fast}) - Temperaturfunktion

Gleichung 3.5.1.3

$$K_{fast} = 0,0001 + 0,0005 * T_{cel} - 6 * 10^{-6} * T_{cel}^2$$

Wobei:

k_{fast} : temperaturabhängiger N-Mineralisationswert (schnell mineralisierbar) in mg pro kg pro Tag

T_{cel} : Bodentemperatur in Grad Celsius (Tagesmittelwert)

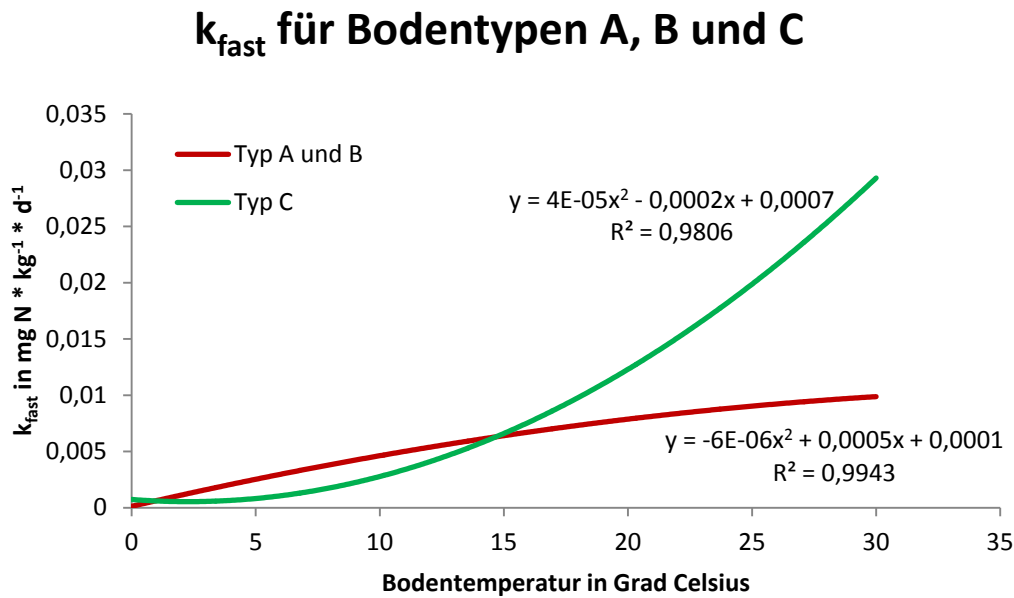


Abb. 3.5.1.2(6): Temperaturfunktionen (polynomisch) für k_{fast} für Bodentypen A, B und C.

Quelle: Verändert nach Böttcher & Heumann, 2008

N-Mineralisation für Bodentyp A (K_{slow}) - Temperaturfunktion

Gleichung 3.5.1.4

$$K_{slow} = 2^{e-06} * T_{cel}^2 + 2^{e-07} * T_{cel} + 1e^{-05}$$

N-Mineralisation für Bodentyp B (K_{slow}) - Temperaturfunktion

Gleichung 3.5.1.5

$$K_{slow} = 2^{e-06} * T_{cel}^2 + 3^{e-05} * T_{cel} - 3^{e-05}$$

N-Mineralisation für Bodentyp C (K_{slow}) - Temperaturfunktion

Gleichung 3.5.1.6

$$K_{slow} = 2^{e-06} * T_{cel}^2 + 5^{e-06} * T_{cel} + 1^{e-05}$$

Wobei:

k_{slow} = temperaturabhängiger N-Mineralisationswert (langsam mineralisierbar) in mg pro kg pro Tag

T_{cel} = Bodentemperatur in Grad Celsius (Tagesmittelwert)

k_{slow} für Bodentypen A, B und C

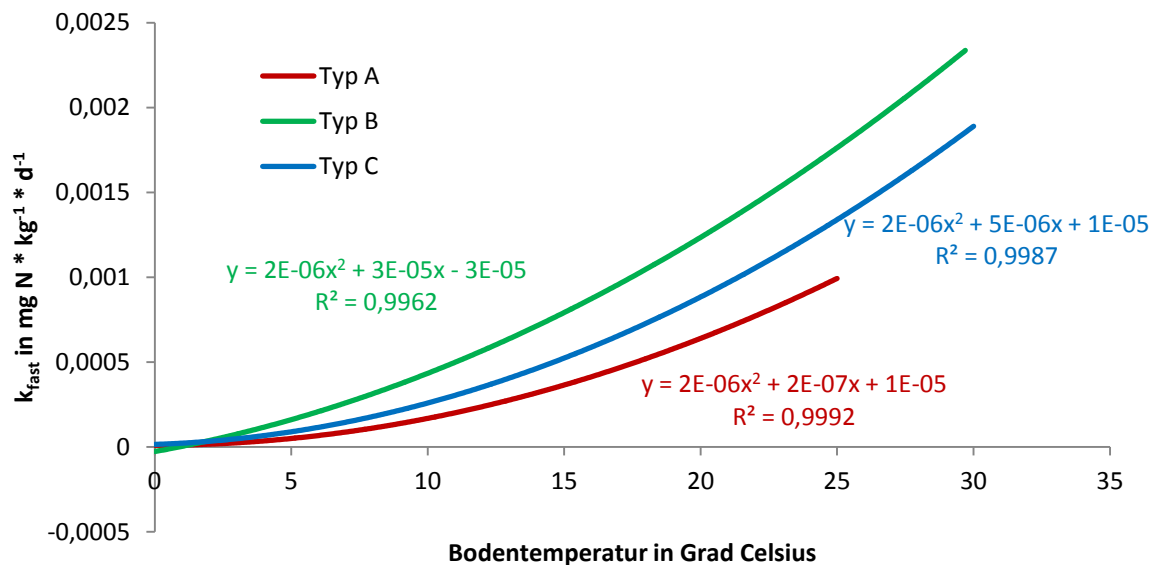


Abb. 3.5.1.3(7): Temperaturfunktionen (polinomisch) für k_{slow} für Bodentypen A, B und C.

Quelle: Verändert nach Böttcher & Heumann, 2008

Bodenwassergehaltsabhängige N-Mineralisation (relativ)

Gleichung 3.5.1.7

$$N_{mine} = -0,0013 * Vol_{\%}^2 + 0,0739 * Vol_{\%} - 0,00125$$

Wobei:

$Vol_{\%}$: volumetrischer Wassergehalt des Bodens

N_{mine} : relative, wassergehaltsabhängige N-Nettomineralisation

Der aktuelle Bodenwassergehalt wird im Modell für jede Schicht wie folgt berechnet:

Aktueller Bodenwassergehalt

Gleichung 3.5.1.8

$$Wat_{cont} = (\theta / FK) * (FK - PWP)$$

Wobei:

Wat_{cont} : volumetrischer Wassergehalt der Bodenschicht (10 x 100 x 100 cm)

θ : Punkt Theta aus der Wasserhaushaltsgleichung (3.3.3.1) (Vol%)

FK : Feldkapazitätspunkt (Vol%)

PWP : permanenter Welkepunkt (Vol%)

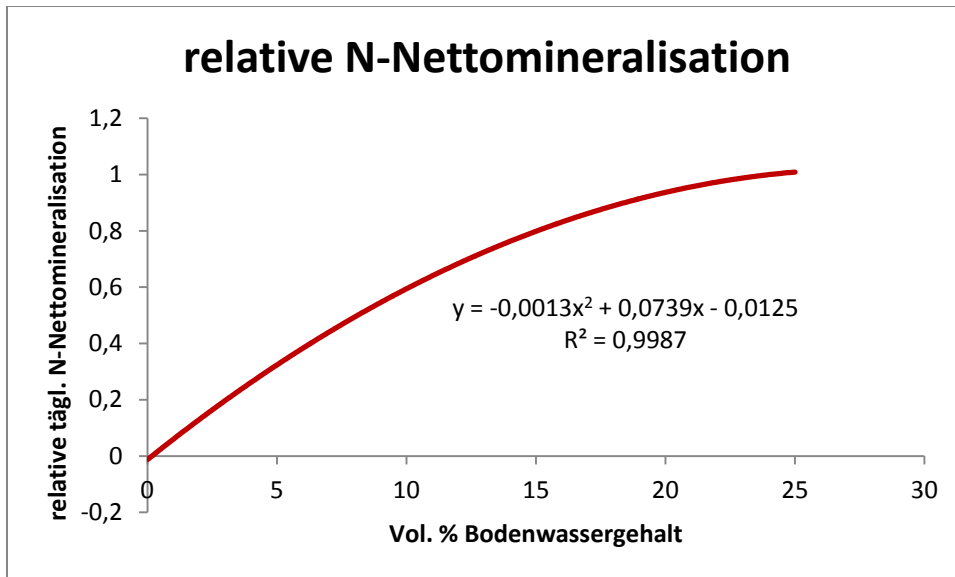


Abb. 3.5.1.4(8): Wassergehaltsfunktion (polynomisch) für relative N-Nettomineralisation.

Quelle: Verändert nach Böttcher & Heumann, 2008

Für die im Boden vorhandenen Stickstoffmengen, welche für die schnelle und die langsame Mineralisation zur Verfügung stehen, wird die Größe *N-Pool* eingeführt. N-Pool ist düngungs- und vorfruchtabhängig und liegt für N_{fast} deutlich unter der für N_{slow} (Böttcher & Heumann, 2008).

Nach Böttcher und Heumann (2008) liegen die Poolgrößenwerte für N_{fast} bei einer Düngerausbringung von 120 kg Stickstoffdünger (mineralisch oder Gülle) bei etwa 15 bis 20 mg pro kg Boden, wobei der höhere Wert für die Gölledüngung gilt.

Die Poolgröße für N_{slow} liegt mit etwa 140 mg pro kg um den Faktor 10 über den Werten für N_{fast} und ist kaum von der Düngungsart und der Düngungshöhe abhängig.

Für N_{fast} lässt sich eine Abhängigkeit der Poolgröße von der Vorfrucht feststellen. Sie steigt von 20 mg pro kg (Zuckerrüben) über Getreide (ähnlich wie Rüben), zum Mais und Winterraps auf fast 30 mg pro kg an. Zum derzeitigen Entwicklungsstand des Modells (08/2012) wird für die Poolgrößen aus Gründen der Vereinfachung (keine Berücksichtigung von Vorfruchteffekten) von mittleren Werten ausgegangen. Sie liegen für N_{fast} bei 25 mg pro kg Boden und für N_{slow} , je nach Bodenart und deren Tongehalt, zwischen 125 und 700 mg pro kg Boden. Die mittlere Dichte von Ackerböden wird mit 1,5 Gramm pro cm^3 angenommen.

3.5.2 Die Stickstoffaufnahme der Pflanzen

Für die Simulation der pflanzlichen Aufnahme des im Boden vorliegenden Stickstoffs (N_{min}) wird im Modell eine Gleichung (Gleichung 3.5.2.1) aus dem Wageniger Modell INTERCOM (Kropff & van Laar, 1993) verwendet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die maximal von den Pflanzen aufnehmbare

bzw. „angeforderte“ Menge an Stickstoff der Differenz von maximalem und gegenwärtigem Stickstoffgehalt in den Pflanzen entspricht. Der maximale N-Gehalt in den Pflanzen lässt sich mittels einer einfachen, linear abfallenden Kurve mit einem Startwert (Auflaufen) und einem Endwert (Reife) beschreiben. Kropff und van Laar (1993) siedeln diese Werte (für C₃-Gräser) bei 5% (Auflaufen), 2,5% (Blüte) und 1,8% (Reife) an. Für C₄-Pflanzen geben die Autoren an, dass aufgrund der C₄-Fotosynthese mit verringerten RuBisCO-Werten die gleiche Fotosyntheseleistung wie bei C₃-Pflanzen erreicht wird und somit auch die Stickstoffkonzentration im Blatt um bis zu 50% geringer sein kann, ohne dass es dabei zu einer Assimilationsminderung kommt.

Für das Modell EPIC (siehe Kapitel 2) haben Kiniry et al. (1995) Pflanzenparameter für verschiedene Ackerkulturen zusammengestellt. Für die Kulturen Winter- und Sommerweizen (1,48%), Sommergerste (1,31%), Mais (1,38%) und Raps (1,28%) wurden die N_{max}-Werte aus dieser Zusammenstellung im Modell BioSTAR übernommen. Für Roggen (0,9%), Triticale (1,13%), Gerste (0,98%), Sorghum und Sonnenblumen entstammen die Endstickstoffgehalte aus Maier (Maier, et al. , 1998) und Scholz (Scholz, et al. , 2011).

Stickstoffaufnahme der Pflanzen

Gleichung 3.5.2.1

$$N_{\text{uptake}} = ((N_{\text{max}} - N_{\text{cont}}) / 2$$

Wobei:

N_{uptake} : Stickstoffaufnahmemenge in kg pro Hektar pro Tag

N_{max} : vom Stadium abhängiger, pflanzlicher Stickstoffmaximalwert in kg pro Hektar

N_{cont} : aktueller pflanzlicher Stickstoffgehalt in kg pro Hektar

Die Stickstoffentnahme (N_{out}) des Bodens wird im Modell über einen Abgleich der Größen „verfügbare Stickstoffmenge (N_{avail})“ und „angeforderte Stickstoffmenge (N_{uptake})“ geregelt.

Ist die vom Bestand angeforderte Stickstoffmenge größer als die vom Boden verfügbar gemachte Menge, so ist N_{out} gleich N_{avail}. Ansonsten ist N_{out} gleich N_{uptake}.

Die Größe N_{avail} setzt sich aus der kumulativen (also aus allen Bodenschichten und Tagen anfallenden) N-Mineralisationsmenge und der zusätzlich gedüngten N-Menge zusammen.

Für die Stickstoffdüngung sind im Modell drei Düngegaben mit festen Zeitpunkten vorgesehen, deren Höhe vom Benutzer definiert wird.

Für die tägliche Fortschreibung der Größe N_{avail} wird diese mittels der Stickstoffentnahmemenge N_{out} bilanziert.

3.6 Die Entwicklungssteuerung

3.6.1 Die Pflanzenentwicklung

Neben den Berechnungen von Stoffstrombilanzen (CO₂, Wasser, Stickstoff) ist die zeitliche Verfolgung dieser Prozesse in einem Pflanzenmodell von großer Bedeutung. Sowohl annuelle als auch mehrjährige Ackerkulturen durchlaufen innerhalb ihrer Wachstumsperiode verschiedene phänologische Stadien, welche im Falle von Winterungen und mehrjährigen Kulturen durch die Winterruhe getrennt werden. Für alle mono- und dikotylen Nutzpflanzen existieren in Deutschland sog. BBCH-Skalen (**B**iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, **B**undessortenamt und **C**hemische Industrie) (Meier, 2001).

Auf einer BBCH-Skala wird die Phänologie in 10 Makrostadien unterteilt (Keimung, Blattentwicklung, Schossen, Ähren-/Rispen-schwellen, Ähren-/Rispen-schieben, Blüte, Fruchtentwicklung, Frucht- und Samenreife, Absterben), die von 0 bis 9 durchnummeriert sind und jeweils noch einmal mehrere Mikro-stadien enthalten. Die Nummerierung der Stadien erfolgt als zweistellige Ganzzahl (Makrostadium, Mikro-stadium) (Abbildung 3.6.1.1).

Da je nach Klimaraum sowie ggf. auch regional andere Wachstumsbedingungen für Agrarpflanzen gelten (kürzere oder längere Vegetationsperiode, niedrigere oder höhere Temperaturmittelwerte), sind auch die Zeitpunkte für das Einsetzen der BBCH-Stadien naturgegeben variabel.

Um nun also die Informationen aus der BBCH-Skala zur Phänologie einer Kultur in einem Pflanzenmodell nutzen zu können, müssen die Stadien einen zeitlichen Bezugsrahmen erhalten, der auf die klimatischen Gegebenheiten des Modellierungsraumes angepasst ist.

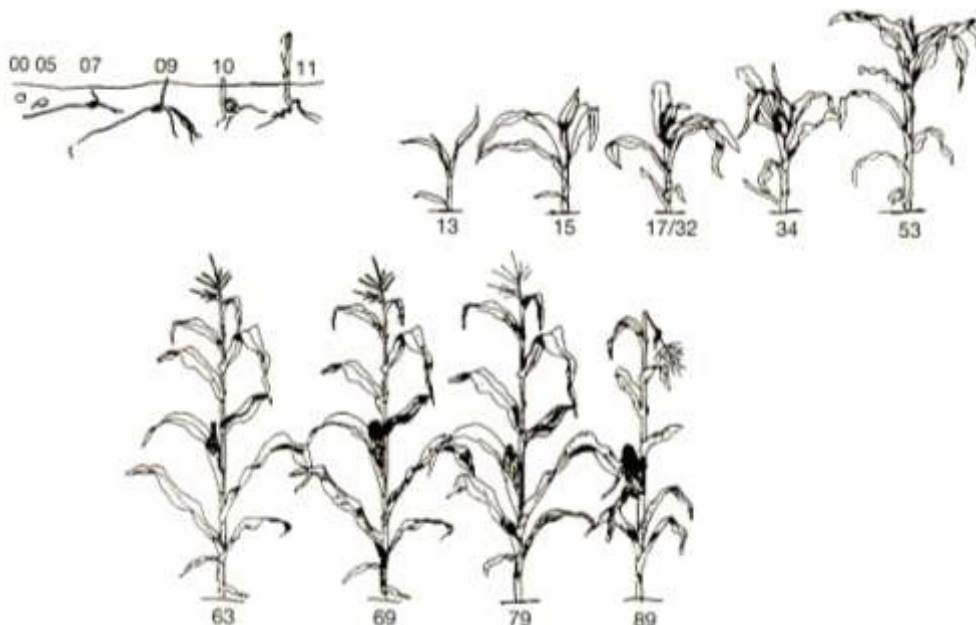


Abb. 3.6.1.1(9): Entwicklung der Maispflanze mit BBCH-Code Stadien.

Quelle: Meier, 2001

Für die Erstellung eines zeitlichen Bezugsrahmens können Phänologiedaten verwendet werden. Phänologie lässt sich wie folgt definieren (DWD-Zitat, 2011):

„Die Phänologie (im Deutschen Wetterdienst) befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen. Es werden die Eintrittszeiten charakteristischer Vegetationsstadien (Phasen) beobachtet und festgehalten. Sie stehen in enger Beziehung zur Witterung und zum Klima und eignen sich daher für die verschiedensten Anwendungsgebiete und für vielseitige wissenschaftliche Untersuchungen. Das Wort Phänologie ist dem Griechischen entlehnt und bedeutet in wörtlicher Übersetzung Lehre von den Erscheinungen.“

Phänologischen Daten liegt idealerweise immer ein längerer Beobachtungszeitraum zugrunde. Ausnahmen bilden hier natürlich Betrachtungen, bei denen klimawandelbedingte Phänologieänderungen zum Tragen kommen.

So hat sich z. B. bei den Winterungen Weizen, Roggen und Gerste der Zeitpunkt der Blüte für den Zeitraum 1991 – 2008 gegenüber der Klimahauptperiode 1961 – 1990 im Raum Niedersachsen um etwa sieben Tage nach vorne verschoben (Karpenstein & von Buttlar, 2012).

Um in einem Pflanzenmodell den Entwicklungsverlauf einer Kultur (z. B. nach der BBCH-Skala) auf der Zeitachse einordnen zu können, müssen die entsprechenden Phänologiedaten in das Modell integriert werden. Das heißt also, dass für das Erreichen eines jeden Stadiums und für jede Kultur eine mittlere Zeitspanne oder ein Datum vorgegeben werden muss. Da Pflanzenmodelle (sofern sie mit Tageswerten rechnen) ihre Rechenschritte entweder mittels Kalendertagen (z. B. Aqua Crop) oder als julianische Tageszahl (BioSTAR) verfolgen, kann so die Pflanzenentwicklung gesteuert werden.

Eine weitere Möglichkeit der Entwicklungssteuerung in Pflanzenmodellen liegt in der Benutzung von Wärmesummen (engl. *growing degree days*). Eine weitläufig verwendete Berechnung der Wärmesumme findet sich bei McMaster (1997). Ausgehend von einer Basistemperatur, die eine Kultur benötigt, um Fotosynthese betreiben zu können, wird von den Tagesmitteltemperaturen dieser Basiswert abgezogen und die Ergebnisse der einzelnen Tage aufsummiert (Gleichung 3.6.1.1).

Wärmesummenberechnung

Gleichung 3.6.1.1

$$T_{\text{sum}} = (T_{\text{min}} + T_{\text{max}})/2 - T_{\text{basis}}$$

Wobei:

T_{basis} : Basistemperatur in Grad Celsius

T_{min} : Tagesminimum in Grad Celsius

T_{max} : Tagesmaximum in Grad Celsius

Um über die Wärmesummen eine Entwicklungsverlaufskurve zu simulieren, müssen die notwendigen Wärmesummen für das Erreichen der einzelnen Makrostadien bekannt sein.

Im Modell BioSTAR wird für die Entwicklungssimulation ein leicht abgewandelter Ansatz aus der Familie der Wageningen Pflanzenmodelle verwendet (Penning de Vries, et al., 1989).

Bei diesem Ansatz wird zunächst durch eine Funktion (linear o. polynomisch) die Reaktion der Pflanzenentwicklung auf die Tagesmitteltemperatur bestimmt (Wertebereich von 0 - 1). Der Ausgabewert dieser Funktion wird dann als Multiplikator für einen Koeffizienten verwendet, mit dem die Entwicklungsgeschwindigkeit der Pflanzen in Einheiten pro Tag (dimensionslos) definiert wird (Gleichung 3.6.1.2). Der Wertebereich der dimensionslosen Entwicklungsskala beginnt im Modell bei Null (Auflaufen), läuft dann über 1.3 (Blüte) und endet bei 2 (Totreife). Dieser Wertebereich ist aus dem Wageningen Ansatz übernommen worden, er könnte aber theoretisch auch eine andere Skalierung erhalten (z.B. 0 – 9). Für einen leichteren Abgleich existiert im Modell BioSTAR eine direkte Konvertierung der modellinternen Entwicklungsskala an die BBCH-Stadien für Mais und Getreide (siehe oben).

Entwicklungsgeschwindigkeit

Gleichung 3.6.1.2

$$DEV_{\text{Stage}} = (-0,928 + 0,1578 * T_{\text{CEL}} - 0.0032 * T_{\text{CEL}}^2) * Dev_{\text{koef}}$$

Wobei:

DEV_{Stage} : Entwicklungsstadium, Wertebereich 0 – 2,0 (dimensionslos)

T_{CEL} : Tagesmitteltemperatur in Grad Celsius

Dev_{koef} : variabler Entwicklungskoeffizient (vor Blüte, nach Blüte)

3.6.2 Blattflächenbildung, Sensenz und Abreife

Ein Modellparameter, der insbesondere für die Fotosynthesekapazität, und somit für die Assimilationsleistung eines Bestandes zum Tragen kommt, ist der Wert des Blattflächenindex (BFI). Der Blattflächenindex kann als die Hälfte der absoluten Blattoberfläche zur Einheit der Bodenoberfläche definiert werden. Er ist eine dimensionslose Einheit und wird in m² Blattfläche zu m² Bodenfläche angegeben (Jonckheere & Fleck, 2004). Neben dieser Definition des BFI existieren

noch weitere Definitionen (Zheng & Moskal, 2009), auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

Der BFI steigt bei laubwerfenden Pflanzen im Frühjahr bis zum Sommer an, erreicht dann einen Maximalwert und nimmt zum Herbst hin wieder ab (Jonckheere & Fleck, 2004). Grafisch beschrieben nimmt eine (optimale) BFI-Kurve in etwa die Form einer Gauß'schen Glockenkurve an (Birch, et al., 1998) (Elings, 2000), kann aber auch erheblich von dieser Form abweichen.

Der Blattflächenindexwert erreicht bei fünf einen für die Lichtinterzeption nahezu optimalen Wert (>95%). BFI-Werte können im Falle von Wäldern aber auch für Kulturpflanzen durchaus über fünf liegen.

Anhand des BFI-Wertes können außerdem Rückschlüsse auf die Bestandesdichte von Ackerkulturen (Wang, 2001) sowie auf die Wasserversorgung (Steduto & Hsiao, 1998) (Mailhol & A.A. Olufayo, 1997) (Krieg, 1983) (Han & Li, 2008) und Nährstoffversorgung (Gillet, et al., 1999) (Albrizio & Steduto, 2005) (Richter, et al., 2001) eines Bestandes gemacht werden.

Da die Entwicklung des Blattflächenindex bei guter Nährstoff- und Wasserversorgung als direkte Funktion der zur Verfügung stehenden Temperatursumme betrachtet werden kann, lassen sich BFI-Kurven in einem Pflanzenmodell sehr gut über den Parameter der Umgebungstemperatur (als Tagesmittelwert) modellieren. Diese Art der BFI-Modellierung ist bereits in vielen Modellen erprobt und durch Feldmessungen validiert worden (Vleeshouwers, 1998), (Clifton-Brown, et al., 2000), (van der Werf, et al., 1993), (Soltani & Galeshi, 2002), (Chapman, et al., 1993), (Lafarge & Hammer, 2002), (Lambert, et al., 1999).

Eine weitere Methodik zur Modellierung von Blattflächen in einem Pflanzenmodell wird in Penning de Vries et al. (1989) beschrieben. Hierbei wird zugrunde gelegt, dass jede Kultur durch ein spezifisches Blattgewicht (Gramm Blattmasse pro Hektar Blattfläche) gekennzeichnet ist. Für die Bestimmung der Blattfläche auf diesem Wege ist allerdings ein weiterer Algorithmus im Modell erforderlich, der als Ergebniswert den Anteil der Blattmasse an der Gesamtbiomasse berechnen muss.

Da diese sog. Assimilatallokation (Penning de Vries, et al., 1989) in Modellen einen weiteren potenziellen Unsicherheitsfaktor darstellt, wurde im Modell BioSTAR die Methodik der temperaturbasierten BFI-Modellierung verwendet.

Da die Entwicklungskurven der Blattfläche je nach Kultur unterschiedliche Temperatursummen erfordern, wird im Modell BioSTAR auf die jeweiligen, kulturangepassten Entwicklungskurven (siehe oben) zurückgegriffen. Dies ist insofern sinnvoll, da die Blattflächenentwicklung direkt an die Gesamtentwicklung des Bestandes gekoppelt ist. So kann z.B. davon ausgegangen werden, dass der maximale BFI-Werte vor dem Zeitpunkt der Blüte erreicht wird, und dass hiernach mit dem Eintritt

der Pflanzen in die generative Phase (nach der Blüte) die Seneszenz, also das Absterben der grünen Blattmasse beginnt.

Für die Modellierung des BFI wurde im Modell eine Polynomfunktion 6. Grades (Gleichung 3.6.2.1, Abbildung 3.6.2.1) gewählt

Optimaler Blattflächenindexwert

Gleichung 3.6.2.1

$$\text{BFI-Opt} = -0,993 * \text{Dev}_{\text{st}}^6 + 6,2556 * \text{Dev}_{\text{st}}^5 - 13,764 * \text{Dev}_{\text{st}}^4 + 11,828 * \text{Dev}_{\text{st}}^3 - 3,1211 * \text{Dev}_{\text{st}}^2 + 0,7494 * \text{Dev}_{\text{st}} + 0,031$$

Wobei:

BFI_{opt} : optimaler BFI-Wert

Dev_{st} : Entwicklungsstadium (dimensionslos)

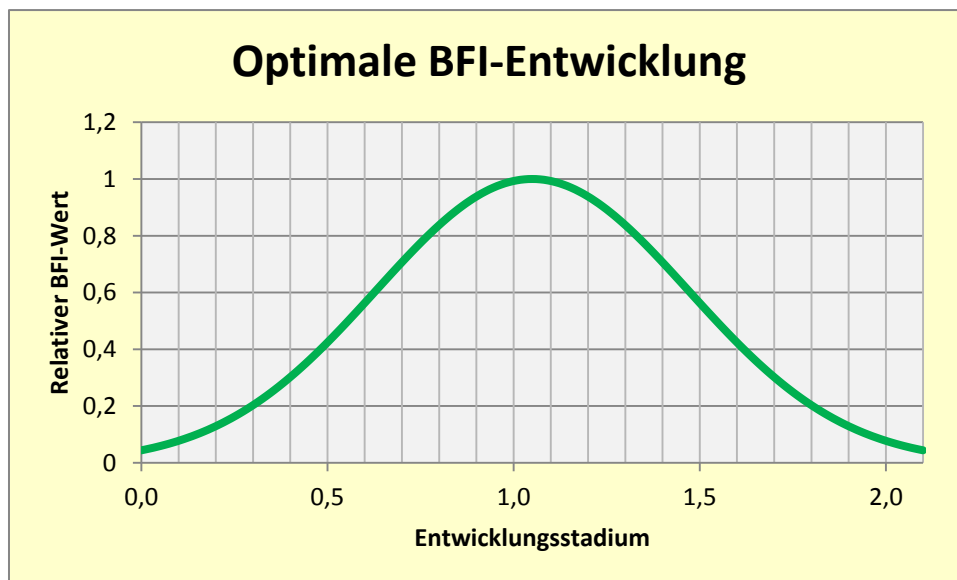


Abb. 3.6.2.1(10): Polynomische Kurvenanpassung (Gauss-Normalverteilung) für den BFI-Verlauf

Quelle: Eigene Darstellung

Wie bereits eingangs erwähnt, kann Wasserstress zu einer Verminderung der Blattentfaltung führen (Boyer, 1970b), (Hsiao & Acevedo, 1974), (van Volkenburgh & Boyer, 1985), (Meyer & Boyer, 1972). Dies trifft insbesondere zu, wenn sich die Pflanzen in der vegetativen Phase befinden und ihr Blattwerk aufbauen.

Bei Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstress auf die Fotosyntheserate und die Zellenausdehnung von Soyabohne, Mais und Sonnenblume hat sich gezeigt, dass mit einem Absinken des Blattwasserpotenzials (als Reaktion auf das Bodenwasserpotenzial) insbesondere die Zellenausdehnung in allen drei Kulturen betroffen war (Boyer, 1970b). Im Gegensatz zum Verlauf der Fotosynthesekurve, die auch noch bei höheren Blattwasserpotenzialen stabil blieb und erst ab

Potenzialen von – 1,2 MPa signifikant zu sinken begann, fiel die Kurve der Zellausdehnungsrate schon bei Drücken von unter -0,4 MPa steil ab.

Um den Einfluss von Wasserstress auf die Blattflächenausdehnung im Modell zu simulieren, wird die Blatt-Neubildungsrate (Gleichung 3.6.2.3) mit dem Faktor "Fact_{exp}" aus Gleichung 3.6.2.2 multipliziert.

Ausdehnungsfaktor für Blattfläche und Sprosshöhe

Gleichung 3.6.2.2

$$\text{Fact}_{\text{exp}} = 0,0082 * \Psi_s^2 - 0,1975 * \Psi_s + 1,1901$$

Wobei:

Fact_{exp} : Ausdehnungsfaktor für Blattfläche (Wertebereich 0 -1) dimensionslos

Ψ_s : Bodensaugspannung in MPa⁻¹

Für die Berechnung der mit jedem Zeitintervall (Tag, Monat) neu hinzukommenden oder absterbenden Blattmasse wird mittels Gleichung 3.6.2.4 und dem Faktor aus Gleichung 3.6.2.2 ein Wert (LAI_{new}) berechnet und dieser zu der bestehenden Blattmasse addiert (bzw. subtrahiert bei negativen Werten)(Gleichung 3.6.2.4).

Blattflächenberechnung

$$\text{LAI}_{\text{new}} = (\text{LAI}_{\text{opt}} - \text{LAI}_{\text{opt}_0}) * \text{Fact}_{\text{exp}}$$

Gleichung 3.6.2.3

$$\text{LAI} += \text{LAI}_{\text{new}}$$

Gleichung 3.6.2.4

Wobei:

LAI_{new} : neu zum BFI hinzukommender oder vom BFI abzuziehender Wert

LAI_{opt} : optimaler, entwicklungsspezifischer BFI-Wert

LAI_{opt_0} : optimaler, entwicklungsspezifischer BFI-Wert der vorigen Berechnung (Tag, Monat)

Fact_{exp} : Blattflächen-Ausdehnungsfaktor aus Gleichung 2.6.4

Die Wuchshöhe des Bestandes

Gleichung 3.6.2.5

$$\text{HIGHT} = \text{Wenn } \text{DEV}_{\text{ST}} \geq 1 ; \text{ dann} = \text{HIGHT}_{\text{max}} ; \text{ sonst} = \text{HIGHT}_{\text{max}} * \text{DEV}_{\text{ST}} * \text{Fact}_{\text{exp}}$$

Wobei:

HIGHT : Bestandeshöhe in cm

DEV_{ST} : Entwicklungsstadium (dimensionslos)

HIGHT_{max} : maximale Pflanzenhöhe in cm

Fact_{exp} : Ausdehnungsfaktor

Eine Entwicklung, die sich bei Wassermangel in Getreide-, und Maisbeständen in der Abreifephase beobachten lässt, ist die sog. *Notreife*.

Wird in dieser letzten Entwicklungsphase des Getreides das Wasser für die Getreidepflanzen knapp, werden alle verfügbaren Ressourcen dafür aufgewendet, keimfähige Samen für die nächste Pflanzengeneration hervorzubringen. Als Folge stirbt die grüne Blattmasse rasch ab und die Körner bzw. Kolben der Maispflanze sind zum Erntezeitpunkt kleiner. Sowohl der Korn- als auch der Gesamtbiomasseertrag fallen geringer aus. Um diese Entwicklung simulieren zu können, existieren im Modell zwei weitere Funktionen: Ripeaccel und Emripe.

Mit Ripeaccel (Gleichung 3.6.2.6) wird die Entwicklung in der Abreifephase beschleunigt, also der Gesamtzyklus verkürzt, mit Emripe (Gleichung 3.6.2.7) wird die Biomasse- und somit gleichzeitig die Kornbildung reduziert.

Reifebeschleuniger (greift ab Entwicklungsstadium BBCH > 80) Gleichung 3.6.2.6

$$RP_{\text{accel}} = 0,0034 * \Psi^2 - 0,0119 * \Psi + 1.0355$$

Wobei:

RP_{accel} : Reifebeschleunigungsfaktor (wirkt auf die Entwicklungsgeschwindigkeit ein)

Ψ : Bodensaugspannung in MPa^{-1}

Notreife (greift ab $\Psi > 10$ und Entwicklungsstadium BBCH > 80) Gleichung 3.6.2.7

$$Em_{\text{ripe}} = -0,1607 * \Psi + 2,5179$$

Wobei:

Em_{ripe} : Notreifefaktor (wirkt negativ auf die Ertragsbildung ein)

Ψ : Bodensaugspannung in MPa^{-1}

3.6.3 Wurzelbiomasse und Ertragsbildung

Die Bestimmung des unterirdischen Anteils an der Gesamtbiomasse ist eine in einem Pflanzenmodell schwierig zu ermittelnde Größe (siehe 3.4).

Im Modell BioSTAR wird hierfür zunächst die Gesamtwurzellängendichte (Summe aller Bodenschichten nach Gleichung 3.4.4) ermittelt und daraus dann ein Wert für die mittlere (arithmetisches Mittel) Wurzellängendichte (WLD) aller Bodenschichten berechnet (Gleichung 3.6.3.1).

Aus der mittleren WLD wird dann in Gleichung 3.6.3.2 ein Wurzelgewicht pro m^2 durchwurzeltem Boden berechnet.

Mittlere Wurzellängendichte

Gleichung 3.6.3.1

$$RL_{\text{dens_av}} = RL_{\text{dens_all}} / No_{\text{rootl}}$$

Wobei:

$RL_{\text{dens_av}}$: Mittlere Wurzellängendichte (WLD) aller Schichten in cm pro cm³

$RL_{\text{dens_all}}$: Gesamtwurzellängendichte aller Schichten in cm pro cm³

No_{rootl} : Anzahl der durchwurzelten Schichten

Gesamtwurzelgewicht

Gleichung 3.6.3.2

$$Rw_{\text{tot}} = RL_{\text{dens_av}} * 1000 * No_{\text{rootl}} * Rw / 1000$$

Wobei:

Rw_{tot} : Gesamtwurzelgewicht in Gramm pro Quadratmeter

$RL_{\text{dens_av}}$: Mittlere Wurzellängendichte (WLD)

Faktor 1000 : Umrechnung auf Fläche (1 m²)

No_{rootl} : Anzahl der durchwurzelten Schichten

Rw : Wurzelgewicht in Milligramm pro Meter

1000 : Umrechnung von Milligramm auf Gramm

Der Kornertrag kann theoretisch über Assimilat-Allokation (Penning de Vries, et al., 1989) geregelt werden. Bei dieser Methode sind Unsicherheiten allerdings nicht auszuschließen, da die Allokation der Assimilate von den Pflanzen immer den Umweltgegebenheiten, wie z.B. Wassermangel, angepasst wird. Um diese Unsicherheiten zu umgehen, werden im Modell BioSTAR die für diverse Kulturen verfügbaren und empirisch ermittelten Korn/Stroh-Verhältniswerte zum Erntezeitpunkt verwendet. Diese im englischen Sprachraum als *Yield* oder *Harvest Index* bezeichnete Größe findet auch in anderen Modellen Anwendung (z.B. AquaCrop).

Um den Anteil von Ähre (beim Getreide) bzw. Korn (beim Raps) zu errechnen, wird eine linear ansteigende Funktion (Gleichung 3.6.3.3) verwendet, die ab der Blüte den jeweiligen Anteil des Kornertrags am Endgewicht bestimmt.

Kornertragsanteil

$$\text{Store} = (\text{Dev}_{\text{st}} - 1) * \text{HI} \quad \text{Gleichung 3.6.3.3}$$

Wobei:

Store : Kornertragsanteil

Dev_{st} : Entwicklungsstadium nach Blüte (Wertebereich 1,3-2)

HI : der kulturabhängige *Harvest Index* (Korn/Stroh-Verhältnis)

3.6.4 Wassermangel und Ertragsbildung

Im Modell wird der Minderertrag durch Wassermangel aus der Differenz zwischen der potenziellen Evapotranspiration und der aktuellen Evapotranspiration gebildet und der Quotient aus Gleichung 2.6.13 dann als Multiplikator für Gleichung 3.6.4.1 verwendet.

Die relative Evapotranspirationsminderung

Gleichung 3.6.4.1

$$\text{ET}_{\text{rel}} = \text{ET}_{\text{act}} / \text{ET}_{\text{pot}}$$

Wobei:

ET_{rel} : relatives Transpirationsdefizit (Wertebereich 0-1)

ET_{act} : aktuelle, an den Bodenwassergehalt angepasste Evapotranspirationsmenge in mm pro Tag

ET_{pot} : potenzielle Evapotranspirationsmenge aus Gleichung 3.2.14 in mm pro m² pro Tag

Für die Berechnung der verdunstungskorrigierten Assimilationsleistung wird dann der Ergebniswert aus Gleichung 3.7.2 (Netto- Fotosyntheserate) mit ET_{rel} multipliziert (Gleichung 3.6.4.1).

Die transpirationskorrigierte Brutto-Fotosyntheserate

Gleichung 3.6.4.1

$$\text{PCO}_{2\text{gross}} = \text{Pg} * \text{Trans}_{\text{rel}}$$

Wobei:

$\text{PCO}_{2\text{gross}}$: Netto CO₂-Assimilation in mol pro Tag

Pg : Brutto-Fotosyntheserate

ET_{rel} : relatives Transpirationsdefizit (Wertebereich 0-1)

3.7 Die Veratmung (Dissimilation) und die Nettofotosynthese

Da es sich bei dem Modell BioSTAR um ein kohlenstoffbasiertes Pflanzenmodell handelt, werden die Vorgänge der Assimilation und der Dissimilation getrennt berechnet. Anders als in strahlungsbasierten oder transpirationsbasierten Modellen, bei denen über die Größen RUE (*radiation use efficiency*) und WP (*water productivity*) schon die Netto-Zuwachsmenge an (oberirdischer) Biomasse erfasst wird (empirische Methode), hat die Berechnung nach dem Kohlenstoffansatz eine mechanistischere Ausprägung und ist daher etwas komplexer (Whistler, et al., 1986).

Für die Berechnung der Veratmung sollte in einem Pflanzenmodell zwischen zwei Komponenten, der Wachstumsatmung und der Erhaltungsatmung, unterschieden werden. Die Beschreibung und die Berechnung dieser beiden Bestandteile der Veratmung und ihren Einfluss auf den Pflanzenertrag hat Amthor (Amthor, 1989) ausführlich dargestellt.

Als Wachstumsatmung (engl. *growth respiration*) wird der CO₂-Kostenaufwand bezeichnet, den die Pflanze für die Allokation und Umwandlung von Assimilaten und deren Einlagerung in ihre Organe hat. Als Erhaltungsatmung (engl. *maintenance respiration*) werden jene CO₂-Verluste der Pflanze bezeichnet, die der Erneuerung ihres Gewebes dienen. Die Wachstumsatmung steigt proportional zu der neu hinzukommenden Biomasse, die Erhaltungsatmung hingegen mit dem Zuwachs der Gesamtbiomasse (Johnson, 1990).

Weiterhin kann ein Ansteigen der Erhaltungsatmung mit einer Zunahme des Stickstoffgehaltes in der Pflanze, mit steigenden Umgebungstemperaturen sowie mit der Alterung der Zellen beobachtet werden (Amthor, 1984).

Im Mittel kann für die Summe der beiden Veratmungskomponenten ein Verlust von etwa 30 – 35% der Brutto-Assimilationsmenge angenommen werden (Amthor, 1989). Der Verlust durch die Wachstumsatmung ist die größere der beiden Komponenten und beträgt zwischen 20-25% der Brutto-Assimilationsmenge (Amthor, 1994).

Um den temperaturbedingten Anstieg der Erhaltungsatmung im Modell zu berechnen, wird die Q₁₀-Methode angewendet (Amthor, 1994). Der Faktor Q₁₀ wird für den Anstieg eines Prozesses (hier die Veratmung) mit jedem Anstieg der Temperatur um 10 Grad Celsius verwendet. Für die Erhaltungsatmung wird ein Q₁₀ von zwei zugrunde gelegt (Amthor, 1984)(Gleichung 3.7.1). Ein Q₁₀ von zwei bedeutet eine Verdoppelung des Prozesses mit jedem Temperaturanstieg um 10 ° C.

Bei der Berechnung der Veratmung im Modell BioSTAR werden für Wurzeln und Stängel unterschiedliche Veratmungskoeffizienten verwendet, bzw. für Blattbiomasse und Reproduktionsorgane noch einmal kulturspezifisch bei den Koeffizienten differenziert (Penning de Vries, et al., 1989). In Gleichung 3.7.2 wird dann mit den Koeffizienten der Veratmung zunächst die

Netto CO₂-Bilanz (mol pro Tag) berechnet und anschließend in Gleichung 3.7.3 die Netto-Biomassenakkumulation in Gramm pro Tag erfasst.

Die Veratmung

Gleichung 3.7.1

$$Rm_{\text{day}} = Rm * 2^{(T_{\text{CEL}} - 20)/10}$$

Wobei:

Rm_{day} : Temperaturkorrigierte Erhaltungsatmung in Gramm CO₂ pro Gramm Biomasse pro Tag

Rm : Koeffizient der Erhaltungsatmung in Gramm CO₂ pro Gramm Biomasse pro Tag

T_{cel} : Temperatur in Grad Celsius

Wert 20 : kulturspezifischer Temperaturpunkt an dem Rm_{day} = Rm

Die Netto CO₂-Bilanz

Gleichung 3.7.2

$$PCO_{2\text{net}} = (PCO_{2\text{gross}} - Rm_{\text{day}}) * Y_G$$

Wobei:

PCO_{2net} : Netto CO₂-Assimilation in mol pro Tag

PCO_{2gross} : Netto CO₂-Assimilation in mol pro Tag

Rm_{day} : Temperaturkorrigierte Erhaltungsatmung in Gramm CO₂ pro Gramm Biomasse pro Tag

Y_G : Koeffizient der Wachstumsatmung (*engl. growth conversion efficiency*)

Die Netto Trockenmassebilanz

Gleichung 3.7.3

$$DM_{\text{net}} = PCO_{2\text{net}} * 44 * (30 / 44)$$

Wobei:

DM_{net} : Netto-Trockenmassegewinn in Gramm pro Tag

PCO_{2net} : Netto CO₂-Assimilation in mol pro Tag

Faktor 44 : Umrechnung von mol auf Gramm

Faktor (30 / 44) : Umrechnung von CO₂ auf Trockenmasse

4. Modellierung von Biomassepotenzialen

4.1 Modelldefinition

Nach Stachowiak (Stachowiak, 1973) ist ein Modell stets ein Modell von etwas, nämlich Abbildung, Repräsentation natürlicher Dinge oder eines künstlichen Originals, das selbst wieder Modell sein kann (Abbildungsmerkmal eines Modells).

Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet, sie erfüllen lediglich ihre Ersetzungsfunktion für a) bestimmte – erkennende und/oder handelnde modellbenutzende - Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen (pragmatisches Merkmal eines Modells).

Weiterhin erfassen Modelle im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellentwicklern und/oder Modellnutzern relevant erscheinen (Verkürzungsmerkmal).

Mathematische Modelle sind demzufolge eine vom Modellierer geschaffene Abbildung eines Ausschnittes der realen Welt, welche in mathematischen Formeln beschrieben ist.

Hierbei wird anhand von ausgewählten, wesentlichen Parametern versucht Zusammenhänge (im Falle von Pflanzenmodellen naturwissenschaftliche Zusammenhänge) festzustellen, die dann in mathematischen Gleichungen beschrieben werden und zusammengefasst Vorgänge in der Natur so simulieren können, dass sich hiermit Prognosen für zukünftiges Verhalten ableiten lassen.

Angesichts der Komplexität aller chemischen und physikalischen Vorgänge, die beim Wachstum von Pflanzen eine Rolle spielen, kann auch ein Pflanzenmodell nur einen stark eingeschränkten Teil dieser Prozesse wiedergeben.

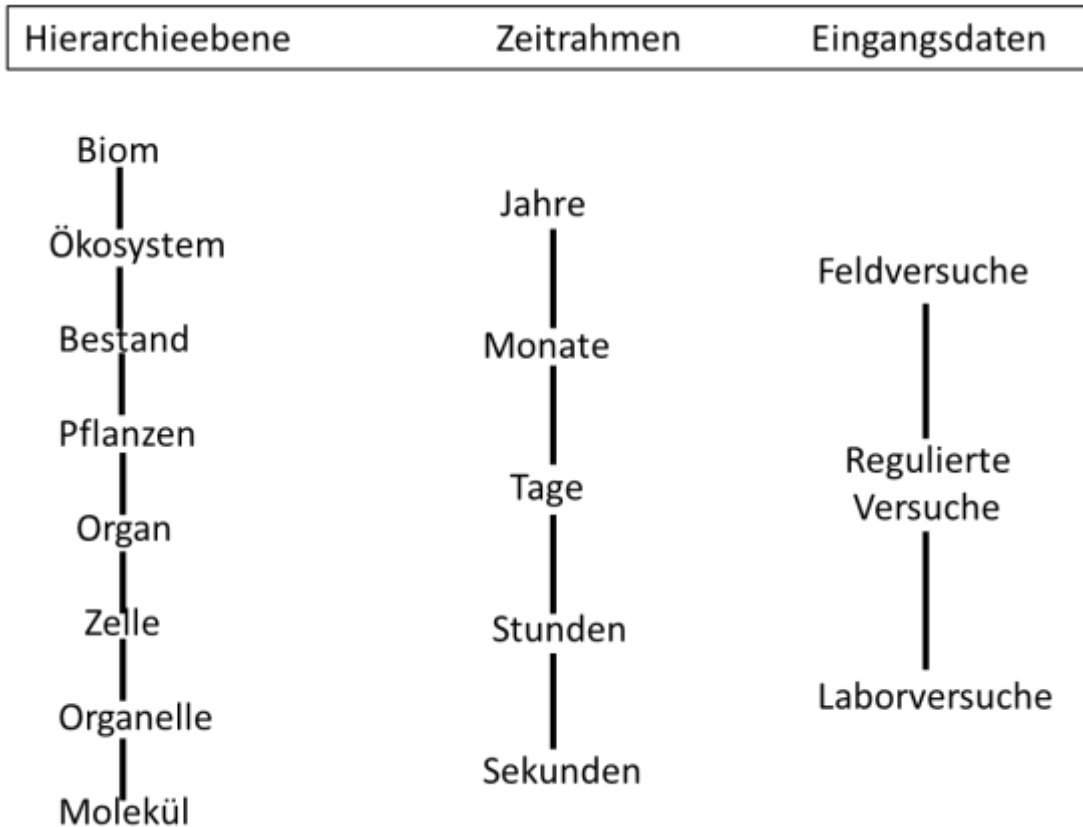


Abbildung 4.1.1(11): Hierarchische Klassifikationen für Pflanzenmodelle.

Verändert, nach Whistler et al. 1986

Bei der Erstellung eines Modells obliegt es den Modellkonstruktoren, die Abläufe und Parameter in das Modell zu integrieren, welche für eine hinreichend genaue Nachbildung der Modellprozesse notwendig sind (Whistler, et al., 1986). Als Faustregel kann gesagt werden, dass ein Modell nicht mehr als 1 bis maximal 2 Ebenen unter der Hierarchieebene konstruiert werden sollte, für die die Modellierungsergebnisse bestimmt sind (Abb. 4.1.1).

Hierarchieebenen sind in diesem Fall die zeitliche und die räumliche Auflösung von Prozessen.

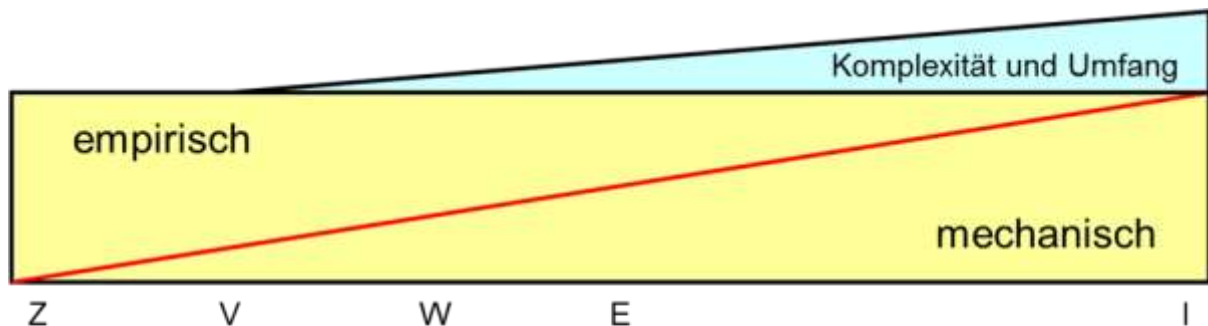
Hierbei gilt es, Redundanzen zu vermeiden und das Modell nicht unnötigerweise mit Gleichungen und Parametern zu überfrachten (Sinclair & Seligman, 2000).

Generell kann gesagt werden, dass mit jedem Schritt nach unten in der Hierarchieebene ein Plus an Modellkomplexität verbunden ist und das Maß der mechanistischen Arbeitsweise in dem Modell zunimmt (Abb. 4.1.2). Graves et al. (2002) weisen jedoch darauf hin, dass ein hohes Maß an Komplexität in einem Pflanzenmodell (Modellentwicklungen aus den 1970er-Jahren) nicht notwendigerweise zu besseren Modellen führt. Eine Auswahl an wichtigen "Schlüsselvariablen" kann demzufolge für die Tauglichkeit eines Modells durchaus genügen.

Rein empirische Pflanzenmodelle verwenden z. B. aus Anbau- oder Feldversuchen hergeleitete Korrelationen und Koeffizienten, um Prozesse im Pflanzenwachstum zu simulieren. Beispiele für solche Koeffizienten sind der RUE-Parameter (radiation use efficiency) oder der WUE-Parameter (water use efficiency).

Ein Modelltyp mit stärker mechanistischer Ausprägung ist z. B. der kohlenstoffbasierte Typus. Hier wird die Trockenmassebildung nicht über einen Koeffizienten sondern als Molekulargleichung dargestellt (vgl. Kapitel 2 und 3).

Viele Pflanzenmodelle sind allerdings Mischtypen und enthalten sowohl empirische als auch mechanistische Komponenten (Whistler, et al., 1986).



Zunahme der Fähigkeiten (von links nach rechts): Zusammenfassen von Daten – Vorhersagen innerhalb der Datengrundlage – Wissenslücken identifizieren - Extrapolierende Vorhersagen – Interpretation von Versuchsergebnissen

Abbildung 4.1.2(12): Typen von Modellen (empirisch, mechanisch), Zunahme von Fähigkeiten und Entwicklung von Umfang und Komplexität.

Verändert, nach Whistler et al. 1986

Auf der Zeitskala lässt sich von den Anfängen der Pflanzenmodellierung bis heute ein Trend zu den sog. *summary models* feststellen. Diese "zusammenfassenden" Modelle sind gegenüber ihren Vorläufern, den *comprehensive models*, also den "umfassenden Modellen", eher empirisch in ihrem Aufbau (vgl. Kapitel 2).

4.2 Modellvalidierung

Wenn in einem Pflanzenmodell die Prozessgleichungen und deren Zusammenspiel mathematisch formuliert sind, muss zwingender Weise eine Überprüfung hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit erfolgen.

Diese Überprüfung erfolgt, indem ein Abgleich mit den vom Modell vorhergesagten Werten - im Falle eines Pflanzenmodells z. B. die Ertragshöhen oder die Verdunstungsmengen im Verlauf der Vegetationsperiode - und den real gemessenen Werten übereinstimmt. Nach Whistler et al. (1986) werden für diese Validierung andere Datensätze verwendet, als vorher bei der Kalibrierung

(Einstellung) der Modellparameter verwendet wurden. Nach Sinclair und Seligman (2000) ist jedoch der reine Beweis, dass die Modellergebnisse mehr oder weniger genau mit den gemessenen Werten übereinstimmen, kein ausreichender Beweis für die Validität eines Modells.

Vielmehr sollte ein Modell danach beurteilt werden, ob seine Hypothesen, also seine Grundannahmen, stimmig sind und ob das Modell in sich logisch auch schlüssig ist.

Weiterhin sollte jedes Modell einem "Verhaltenstest" ausgesetzt werden, in dem überprüft wird, ob dessen Komponenten sich in Übereinstimmung mit beobachteten Werten und Verhaltensweisen befinden.

Dies kann bei einem Pflanzenmodell z. B. das simulierte Verhalten bei sinkenden Bodenwassergehalten, niedrigen Luftfeuchtegehalten oder bei Temperaturextremen sein.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass jedes Modell nur eine "funktionierende Hypothese" ist, dass eine wissenschaftliche Hypothese niemals vollständig bewiesen werden, und somit auch ein Modell niemals vollständig kalibriert werden kann (Whistler, et al., 1986). Dennoch lassen sich mit ausgiebigen Tests die Schwachpunkte eines Modells identifizieren und somit ggf. auch beheben.

4.2.1 Kalibrierung eines Modells

Mit der Kalibrierung eines Modells bezeichnet man den Arbeitsschritt, in dem die aus eigenen Feldversuchen oder aus den Arbeiten anderer Wissenschaftler entnommenen Modellparameter und Koeffizienten auf ihre Funktionsweise und Richtigkeit überprüft, und ggf. angepasst werden.

Sinclair und Seligman (2000) empfehlen Koeffizienten zu verwenden, die physisch, chemisch und pflanzenphysiologisch gut erforscht sind und sich als Koeffizienten in (Pflanzen)-Modellen bereits etabliert haben. Dies hat den Vorteil, dass diese Koeffizienten vermutlich auch außerhalb einer bestimmten Modellstruktur funktionieren.

Weiterhin muss bei der Kalibrierung eines Pflanzenmodells beachtet werden, dass eine Anpassung von vielen (mehr als vier) Koeffizienten dazu führen kann, dass das Modell außerhalb des Erprobungsgebietes nicht mehr funktioniert, ohne die Koeffizienten erneut anzupassen (Sinclair & Seligman, 2000).

Whistler et al. (1986) geben zu bedenken, dass ein Modell nicht mit demselben Datensatz validiert werden sollte, mit dem vorher die Kalibrierung vorgenommen wurde. Die Autoren merken aber auch an, dass gute Datensätze für die Modellentwickler oft eine Rarität sind und man daher oft gezwungen ist, für beide Arbeitsschritte dieselben Daten zu verwenden.

4.2.2 Kalibrierung des Modells BioSTAR

Für die Kalibrierung der im Modell BioSTAR verwendeten Koeffizienten und Parameter wurden Ertrags-, Boden- und Klimadaten von zwei Versuchsgütern der niedersächsischen Landwirtschaftskammer verwendet, die von der Landwirtschaftskammer freundlicherweise zu

diesem Zweck bereit gestellt worden sind. Auf beiden Versuchsstandorten werden auch Landessortenversuche durchgeführt

Bei dem ersten Versuchsgut handelt es sich um den Standort Poppenburg-Nordstemmen im Landkreis Hildesheim, bei dem zweiten Versuchsgut um den Standort Wehm-Werlte im Landkreis Emsland.

4.2.3 Das Versuchsgut Poppenburg

Das Versuchsgut Poppenburg liegt etwa 2 km südlich von Nordstemmen im Gebiet der Hildesheimer Börde (Landkreis Hildesheim).

Im UTM-System (Zone 32 U) hat der Standort die Koordinaten:

553485.79 m E, 5777656.68 m N und liegt 88 m über NN.

Die Jahresdurchschnittstemperatur wird von der Landwirtschaftskammer mit 8,2°C angegeben, der mittlere Jahresniederschlag mit 600 mm.

Der Standort Poppenburg hat mit einer Ackerzahl von über 80 eine allgemein hohe Bodengüte. Die oberen 80 cm des Bodenprofils bestehen aus einer schluffigen Lehmschicht aus Lössablagerungen, die von einer lehmigen Schicht unterlagert wird.

Das Bodenprofil besteht nach Bük50 (Bodenübersichtskarte 1:50.000) aus einer 80 cm mächtigen Schicht aus schluffigem Lehm (Lu) (PWP 18 Vol.%, FK 32,7 Vol.%, Sät. 45 Vol.%, nFK 147 mm, K_0 83 mm/Tag) mit einer zwischengeschalteten, 20 cm starken schluffigen Tonschicht (Tu)(PWP 26 Vol.%, FK 37 Vol.%, Sät. 47 Vol.%, nFK 110 mm, K_0 130 mm/Tag). Hiernach folgen wieder 20 cm schluffiger Lehm und als unterste Schicht, von etwa 80 cm an, ein reiner Lehm (Li) (PWP 19 Vol.%, FK 32 Vol.%, Sät. 45 Vol.%, nFK 130 mm, K_0 70 mm/Tag).

Da die Untergrenze des Bodenprofils aus der Bük50 nicht entnommen werden kann, wird diese für die Verarbeitung im Modell bei 200 cm angenommen. Bei 200 cm Profiltiefe kann davon ausgegangen werden, dass auch für eine tiefwurzelnde Kultur wie den Mais ausreichend Wurzelraum gegeben ist. Die nutzbare Feldkapazität im Profilbereich liegt also bei etwa 266 mm, die des effektiven Wurzelraumes nach KA5 (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden, 2005) (\approx 130 cm) für diese Bodenart bei etwa 165 mm. Grundwasseranschluss besteht auch hier nicht.

In den Jahren 2007 bis 2010 wurden auf dem Versuchsgut u.a. Silomais, Winterweizen, Winterroggen, Wintertriticale, Wintergerste, Sonnenblume und Hirse (Sorghum) angebaut.

Die Witterungsdaten aus den Anbaujahren können der Tabelle 12.4 im Anhang entnommen werden.

4.2.4 Das Versuchsgut Werlte

Das Versuchsgut Wehm-Werlte liegt ca. 2 km südlich des Ortes Werlte und in etwa 60 km Entfernung von der Ems-Mündung. Im UTM-System (Zone U 32) hat der Ort die Koordinaten:

410255.16 m E, 5854687.17 m N, die Höhe über NN beträgt 34 m.

Die Jahresdurchschnittstemperatur wird von der Landwirtschaftskammer mit 9,0°C angegeben, der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 770 mm.

Der Standort Werlte hat mit Ackerzahlen zwischen 30 und 40 eine geringe bis mittlere Bodengüte. Das Bodenprofil besteht nach Bük50 aus einer 160 cm mächtigen Schicht aus lehmigem Sand (SL) (PWP 6 Vol. %, FK 17,9 Vol.%, Sät. 42 Vol.%, nFK 119 mm, K_0 69 mm/Tag) und einer darunter lagernden Schicht aus sandigem Lehm (LS) (PWP 6,6 Vol.%, FK 21,3 Vol.%, Sät. 40 Vol.%, nFK 147 mm, K_0 141 mm/Tag). Auch für Werlte wird die Untergrenze des Bodenprofils bei 200 cm angenommen.

Die nutzbare Feldkapazität im Profilbereich liegt also bei etwa 250 mm, die des effektiven Wurzelraumes nach KA5 (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden, 2005)(\approx 90 cm) für dieses Bodenprofil bei etwa 112 mm. Grundwasseranschluss besteht auch hier nicht.

In den Jahren 2006 bis 2010 wurden auf dem Versuchsgut u.a. Silomais, Winterweizen, Winterroggen, Wintertriticale, Wintergerste, Sonnenblume und Hirse (Sorghum) angebaut.

Die Witterungsdaten aus den Anbaujahren für Werlte können der Tabelle 12.5 im Anhang entnommen werden.

Klima- bzw. Witterungsdaten wurden, sofern vorhanden, direkt von den Messstationen der LWK an den Versuchsstandorten entnommen (Lufttemperatur, Niederschlag). Da aber von diesen Messstellen keine lückenlosen Datenreihen für alle Versuchsjahre vorlagen und Strahlungs- und Luftfeuchtwerte dort gar nicht gemessen werden, wurde für die Lücken und die fehlenden beiden Parameter auf nahegelegene Klimamessstationen zurückgegriffen.

Für den Standort Poppenburg sind dies die DWD-Stationen (Deutscher Wetterdienst) Hildesheim (12 km Entfernung) und Liebenburg-Othfresen (45 km Entfernung).

Für den Standort Werlte sind zusätzlich Daten der DWD-Stationen Dörpen (27 km Entfernung), Lingen (42 km Entfernung) sowie Lönigen (12 km Entfernung) verwendet worden. Insbesondere bei den Parametern „Strahlung“ und „Luftfeuchtigkeit“ kann davon ausgegangen werden, dass auch bei größeren räumlichen Distanzen (hier bis zu 45 km) keine signifikanten Abweichungen bestehen und somit keine Verzerrung der modellierten Ergebnisse bewirkt wird.

Die eigentliche Kalibrierung des Modells unterteilt sich in mehrere Arbeitsschritte. Im ersten Schritt wird mit einer Kultur (z. B. Weizen oder Mais) und einem Klimadatensatz eines Jahres für einen Standort ein Ertrag modelliert. Wenn das modellierte Ergebnis ungefähr innerhalb eines Korridors von +/-10% Abweichung vom gemessenen Ertrag liegt, kann mit weiteren Klimadatensätzen fortgefahren werden (Schritt 2).

Ist das erste Ergebnis noch mit einem größeren Fehler behaftet, müssen nach einer Überprüfung von weiteren Modellausgabeparametern und Verlaufsentwicklungen (z. B. Wasserverbrauch, Bestandesentwicklung, Blattflächenindexentwicklung) die relevanten modellinternen Parameter oder ggf. auch Algorithmen und Kurven entsprechend modifiziert werden. Ist nach einem oder mehreren

Anpassungsschritten ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht worden, kann mit Schritt 2 fortgefahren werden.

In einem zweiten Arbeitsschritt wird mit weiteren Klimadatensätzen überprüft, ob die Einstellungen des Modells auch mit veränderten atmosphärischen Eingangsparametern zufriedenstellende Ergebnisse produzieren. Ist dies der Fall, kann im dritten Schritt der Wechsel zu einem Standort mit einem unterschiedlichen Boden vorgenommen werden.

Verschiedene Bodenstandorte unterscheiden sich einerseits in ihrem Profilaufbau und andererseits in den in den Profilen vorkommenden Bodenarten. Standortsspezifische Bodeneigenschaften bedingen z. B. unterschiedliche Wasserhaltekapazitäten und Saugspannungskurven. Diese Eigenschaften beeinflussen ihrerseits die Wasserverfügbarkeit des Standortes für Pflanzen und somit die "Fruchtbarkeit" des Bodens.

Wenn bei der Modellierung mit veränderten atmosphärischen Eingangsparametern stärkere Abweichungen von den gemessenen Erträgen auftreten, muss der Modellierer die Klimadatensätze, bei denen es zu Abweichungen kommt, analysieren, um Rückschlüsse auf die Modellreaktion ziehen zu können. Wenn der Zusammenhang zwischen Modellabweichung und einem oder mehreren Klimaparametern festgestellt ist, kann im Modell eine Korrektur für die Verarbeitung dieses/dieser Parameter vorgenommen werden.

Da bei der Kurven- und Parameteranpassung immer auch ein „Trial and Error – Prozess“ seitens des Modellierers erforderlich ist und es hierbei auch oft zu unerwünschten Rückkopplungen im Modell kommen kann, kann dieser Prozess sehr zeitintensiv sein.

Wenn die vorangegangenen Arbeitsschritte durchlaufen worden sind und das Modell für die gewählte Kulturart und für unterschiedliche Boden- und Klimaverhältnisse zufriedenstellende Ergebnisse liefert, können für weitere Kulturen Kalibrierungen durchgeführt werden. Da Agrarpflanzen oft ähnliche Merkmale hinsichtlich ihrer phänologischen Entwicklung, ihrer Wasserverwertung und ihrer Biomassebildung besitzen, müssen bei diesem Kalibrierungsschritt in aller Regel weniger Veränderungen an den Modelleinstellungen vorgenommen werden.

4.2.5 Kalibrierung und Validierung Mais (*zea mays*)

Eine Modellkalibrierung kann schon zu einem gewissen Ausmaß eine Validierung des Modells darstellen, nämlich durch die Modellübertragung auf Standorte mit unterschiedlichen Boden- und Klimaeigenschaften.

Eine perfekte und abschließende Modellkalibrierung kann aufgrund der unüberschaubaren Komplexität aller Vorgänge, die sich beim Pflanzenwachstum abspielen, sowie der ausschnittweisen Betrachtung der realen Welt als unmöglich angenommen werden (siehe oben).

Root Mean Squared Error (RMSE)

Gleichung 4.2.5.1

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Fi - Oi)^2}$$

Wobei:

n : Anzahl von Wertepaaren

O_i : beobachtete Werte

F_i : Prognosewerte

Tabelle 4.2.5.1(1) und Tabelle 4.2.5.2(2) Mais Poppenburg (links)u. Mais Werlte (rechts)

Angaben in t/ha			
Jahr	Gemessen	Berechnet	Fehler
P-2007	22	19,8	-2,20
P-2007	25,7	24,5	-1,20
P-2008	22,6	21	-1,60
P-2008	24	22	-2,00
P-2009	19	18	-1,00
P-2010	21,3	19	-2,30
Mittel	20,72		
RMSE	0,49		
%-Fehler	2,37		

Angaben in t/ha			
Jahr	Gemessen	Berechnet	Fehler
W-2006	12,7	15,5	2,80
W-2007	20,1	21	0,90
W-2008	21	20	-1,00
W-2009	23,7	23	-0,70
W-2010	20,8	18	-2,80
Mittel	19,50		
RMSE	1,89		
%-Fehler	9,69		

Somit muss bei der Kalibrierung ein hinreichendes Maß an Verfeinerung hinsichtlich der Modelleinstellungen gefunden werden, ohne dabei den Anspruch zu haben, dass das Modell dabei zwingenderweise für alle beliebigen Eingangsdatensätze eine gleichbleibend hohe Güte an Ausgangsdaten liefern muss.

Für die statistische Fehlerbewertung (mittlerer Fehler über mehrere Jahre) wurde der RMSE (engl. *root mean squared error*) verwendet. Der RMSE wird häufig für die Vorhersagegenauigkeit von Modellen herangezogen und wird mathematisch nach Gleichung 4.2.5.1 berechnet.

Bei der Kalibrierung des Modells wurde mit Mais für den Standort Werlte (Jahr 2010) begonnen und dann mit den Jahren 2009, 2008, 2007 und 2006 nach der oben beschriebenen Methode fortgeföhren. Die modellierten Ertragshöhren für Werlte schwanken mit -2,8 t/ha bis +2,8 t/ha um einen mittleren RMSE von 1,89 t/ha bzw. 9,69% (Tabelle 4.2.5.2).

Als Überprüfungsdatensatz dienten die Maiserträge sowie die Boden- und Klimadaten des Standortes Poppenburg. Für die Modellierung der Maiserträge des Standortes Poppenburg wurden die Modelleinstellungen nicht weiter verändert. Auch bei diesem Datensatz bewegen sich die

Abweichungen der Einzeljahre in etwa innerhalb eines 10%- Bereichs. Allerdings ist für Poppenburg eine stärkere Unterschätzung der Erträge zu verzeichnen (Tabelle 4.2.5.1).

Auch wenn für beide Standorte für die Einzeljahre Abweichungen der modellierten Ergebnisse zu den Messdaten von bis zu 2,8 t/ha zu verzeichnen sind, decken sich die Ertragskurven (gemessen / berechnet) im Vier- bzw. Fünfjahresverlauf gut (Abb. 4.2.5.1 und 4.2.5.2).

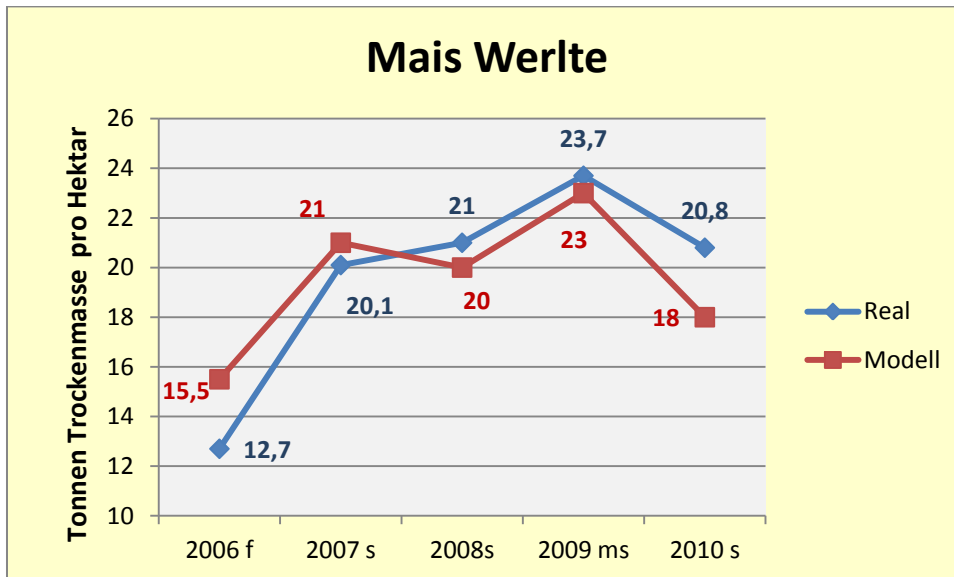


Abb. 4.2.5.1(13): Ertragskurven (Real und Modell) für Werlte

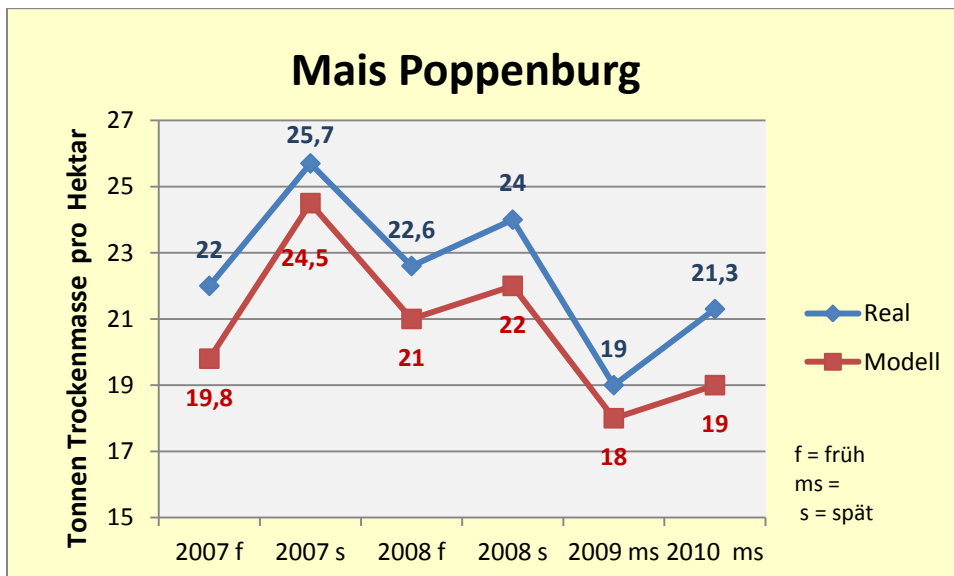


Abb. 4.2.5.2(14): Ertragskurven (Real und Modell) für Poppenburg

Für das Jahr 2007 ließ sich bei der ersten Modellierung insbesondere für den Standort Werlte eine hohe Abweichung (27 t/ha, entspricht ca. 7 t/ha) vom gemessenen Maisertrag feststellen. Eine sehr wahrscheinliche Erklärung liegt in der klimatischen Ausstattung des Aprils 2007 (Tabelle 12.5 im

Anhang). In diesem Monat wurden an den Stationen Poppenburg und Werlte lediglich 3,8 bzw. 1,3 Liter Niederschlag gemessen, die Monatsmitteltemperaturen lagen mit 10,3 und 12,5 Grad eher im
Tabelle 4.2.6.1(3): Wintergetreide Poppenburg (links)u. Werlte(rechts)

Wintergetreide Poppenburg (t/ha)				Wintergetreide Werlte (t/ha)			
Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler	Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
Triticale 08	22,5	20,3	-2,2	Triticale 08	16,6	17,3	0,7
Triticale 09	18,8	16,6	-2,2	Triticale 09	16,7	16,8	0,1
Triticale 10	20	22	2,0	Triticale 10	22,9	18,7	-4,2
Mittel	20,43			Mittel	18,73		
RMSE	1,98			RMSE	2,18		
%-Fehler	9,69			%-Fehler	11,65		
Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler	Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
Roggen 08	20,4	20,8	0,4	Roggen 08	16,7	18,2	1,5
Roggen 09	18,6	17	-1,6	Roggen 09	14,6	17,2	2,6
Roggen 10	19,3	22,3	3,0	Roggen 10	20	19	-1,0
Mittel	19,43			Mittel	17,10		
RMSE	1,88			RMSE	1,51		
%-Fehler	9,69			%-Fehler	8,81		
Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler	Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
Weizen 08	21	18,8	-2,2	Weizen 08	15,2	16,2	1,0
Weizen 09	15,1	14,8	-0,3	Weizen 09	12,5	15,3	2,8
Weizen 10	16,6	19,6	3,0	Weizen 10	16,1	17,3	1,2
Mittel	17,57			Mittel	14,60		
RMSE	2,15			RMSE	0,81		
%-Fehler	12,23			%-Fehler	5,52		
Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler	Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
Gerste 08	16,8	17,7	0,9	Gerste 08	14	14,1	0,1
Gerste 09	16,1	14,7	-1,4	Gerste 09	14	14,6	0,6
Gerste 10	17,7	17,8	0,1	Gerste 10	19,3	17,2	-2,1
Mittel	16,87			Mittel	15,77		
RMSE	0,95			RMSE	1,17		
%-Fehler	5,65			%-Fehler	7,44		
Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler	Kult./Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
Mittel 08	20,175	19,4	-0,8	Mittel 08	15,625	16,45	0,8
Mittel 09	17,15	15,775	-1,4	Mittel 09	14,45	15,975	1,5
Mittel 10	18,4	20,425	2,0	Mittel 10	19,575	18,05	-1,5
Mittel	18,58			Mittel	16,55		
RMSE	1,48			RMSE	1,30		
%-Fehler	7,98			%-Fehler	7,88		

oberen Bereich für diesen Monat. Da der Mais gegen Ende April bis Anfang Mai gedreht (ausgesät) wird und keine Vorfrucht hatte, waren die Maisflächen 2007 im April ohne Bewuchs und durch den fehlenden Niederschlag einer Austrocknung durch Bodenverdunstung ausgesetzt.

Für die Berechnung der Verdunstung von nicht bewachsenen Flächen kann auf eine Studie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Glugla, et al., 2003) zurückgegriffen werden. Je nach nutzbarer Feldkapazität eines Bodens liegt die Verdunstung eines Standortes ohne Bewuchs im Mittel zwischen 0,8 (bei 80 mm Θ_{nFk}) und 1,15 (bei 280 mm Θ_{nFk}) der jeweiligen potenziellen Evapotranspiration (ET_0). Für zwei Standorte ohne Bewuchs (Tagebau Schlabendorf, Lysimeter Nochten) werden Jahres-Evaporationswerte angegeben, die etwa bei 80% der ET_0 für eine Grasreferenzverdunstungsfläche liegen.

Für den Monat April 2007 kann für beide Standorte aufgrund der hohen Verdunstung von einer stark abgesenkten Ausgangsfeldkapazität - zumindest in den oberen Bodenschichten - ausgegangen werden. Die ET_0 -Berechnung ergibt für die fast regenfreie Periode vom 23. März bis zum 5. Mai 2007 für den Standort Poppenburg (höhere Θ_{nFk}) eine Verdunstungsmenge von 107 mm und für Werlte von 94 mm. Dies entspricht nach eigenen Berechnungen dann etwa 90% der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge (in den oberen Bodenschichten, welche ja für die Jungpflanzen relevant sind). Bei der Wiederholungsmodellierung mit den geänderten Bodenwassereinstellungen ergeben sich für Werlte 2007 und Poppenburg 2007 nun die besser angepassten Ertragswerte aus Tabelle 4.2.5.1.

2010 wird der Maisertrag für beide Standorte um jeweils -2,3 t/ha (Poppenburg) und -2,8 t/ha (Werlte) unterschätzt. 2010 lagen die Monatsmitteltemperaturen im Mai bei 9,8° C (Poppenburg) und 10,2° C (Werlte) und damit unter denen der anderen modellierten Jahre und leicht unter dem langjährigen Mittel für die DWD-Station Hildesheim (10,3° C). Da für die vorliegende Modellierung die Minimaltemperatur für Maiswachstum bei 10° Grad eingestellt war, hat dies im Modell die Frühentwicklung gehemmt und somit vermutlich den Endertrag reduziert. Da moderne Silomaisarten durch Züchtung immer mehr an kühlere Klimate angepasst worden sind, muss diese Temperaturreaktionskurve im Modell eventuell neu formuliert werden.

4.2.6 Kalibrierung und Validierung Wintergetreide

Für die Kalibrierung des Modells für die Wintergetreidearten (Triticale, Roggen, Weizen, Gerste) wurde zunächst der Datensatz Poppenburg verwendet und mit Parameteranpassung die in Tabelle 4.2.6.1 aufgeführten Modellierungsergebnisse erzielt (Vgl. auch Abb. 4.2.6.1 und 4.2.6.2).

Für alle vier Kulturen lassen sich zufriedenstellende Modellierungsergebnisse feststellen, wobei es in Einzeljahren für Triticale, Weizen und Roggen zum Teil größere Abweichungen (bis -4,2 t/ha) der modellierten Ergebnisse von den gemessenen Erträgen gibt. Die Kultur mit den geringsten Modellabweichungen ist die Gerste, bei der gemittelte Abweichungen von 0,95 t/ha (RMSE) bzw. 5,65% (Poppenburg) und 1,17 t/ha (RMSE) bzw. 7,44% (Werlte) erzielt worden sind.

Abb. 4.2.6.1(15): Säulendiagramm für gemessene und berechnete Erträge in Poppenburg für Wintergetreide

Die Ertragsfähigkeit des Standortes Poppenburg, mit seiner besseren Wasserhaltekapazität (80 Bodenpunkte, nFKWe = 165 mm) wird im Modell bei der Modellierung von Wintergetreiden tendenziell leicht unterschätzt. Ähnlich war dies auch schon beim Mais zu beobachten. Am Standort Werlte (40 Bodenpunkte, nFKWe = 112 mm) werden sowohl die Wintergetreideerträge, als auch die Maiserträge leicht überschätzt.

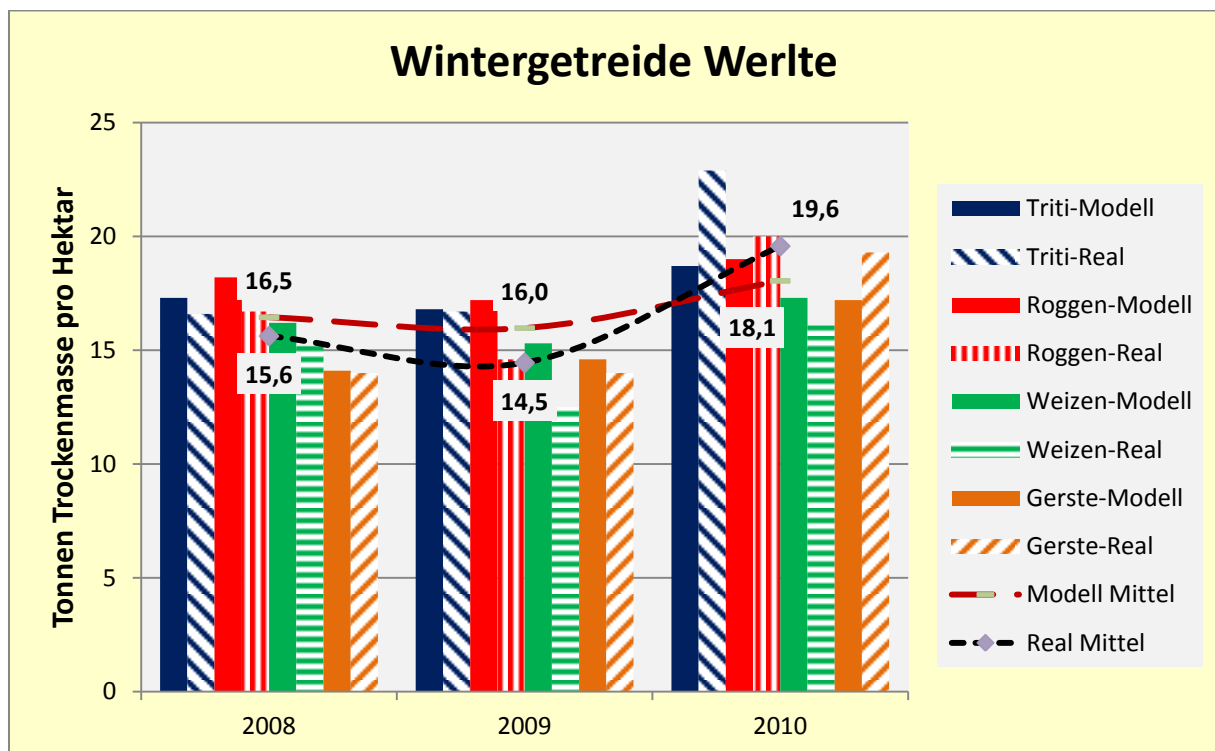


Abb. 4.2.6.1(16): Säulendiagramm für gemessene und berechnete Erträge in Werlte für Wintergetreide

Interessanterweise fällt bei den gemessenen Ertragsdaten aus 2009 und 2010 auf, dass der vom Boden her schlechtere Standort Werlte im allgemein trockeneren Jahr 2010 (März bis Juli 241 mm für Werlte und 223 mm für Poppenburg) für alle vier Wintergetreidearten die höheren Erträge aufweist und Poppenburg um etwa 1,5 Tonnen pro Hektar übertrifft (19,6 t/ha vs. 18,4 t/ha). Im klimatisch günstigeren Jahr 2009 (März bis Juli 341 mm für Werlte und 348 mm für Poppenburg) kommt in Poppenburg der bessere Boden zum Tragen und die gemittelten Erträge liegen bei 17,2 t/ha (Poppenburg) und 14,5 t/ha (Werlte).

Im Jahr 2008 sind sowohl für Werlte als auch für Poppenburg die niedrigsten Modellabweichungen zu verzeichnen (Mittel aller 4 Arten: -0,8 und +0,8 t/ha). Der gemittelte gemessene Ertrag sowie der gemittelte berechnete Ertrag (20,2 und 19,4 t/ha) liegen in Poppenburg deutlich über den Werten

aus Werlte (15,6 und 16,5 t/ha). Die Niederschlagsmengen lagen für den Zeitraum März bis Juli für beide Standorte eher im unteren Bereich (250 mm für Poppenburg und 296 mm für Werlte). Als mögliche Erklärung für die höheren Erträge in Poppenburg können die relativ hohen Globalstrahlungswerte für die Monate Mai und Juni in Betracht kommen. Sie lagen mit $2220 \text{ J} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Tag}^{-1}$ und $2216 \text{ J} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Tag}^{-1}$ etwa 10% über den Werten aus Werlte ($2090 \text{ J} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Tag}^{-1}$ und $1988 \text{ J} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Tag}^{-1}$). Die geringere Niederschlagsmenge von 2008 in Poppenburg in den Monaten Mai und Juni (31,9 mm und 28,2 mm) kann vermutlich durch den größeren Bodenwasserspeicher (s.o.) und die im Juli folgenden Niederschläge (81,7 mm) ausgeglichen werden. Weiter kann bei Betrachtung der Klimatageswerte für Juni 2008 (Tabelle 12.4 im Anhang) festgestellt werden, dass die Niederschläge, die im Juni gefallen sind, in der 2. Monatshälfte kamen und somit in die für die Pflanzenentwicklung so wichtige Phase der Blüte fielen.

4.2.7 Kalibrierung und Validierung Sonnenblume (*helianthus annuus*)

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells hinsichtlich der Ertragssimulation von Sonnenblumenbeständen lagen aus Werlte Ertragsdaten aus fünf Jahren (2006, 2007, 2008, 2009, 2010) und aus Poppenburg Ertragsdaten aus vier Jahren (2007, 2008, 2009, 2010) vor.

Tabelle 4.2.7.1(4) und Tabelle 4.2.7.2(5): Sonnenblume Werlte (links)u. Poppenburg (rechts)

Angaben in t/ha			
Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
W-2006	8,7	10,3	1,6
W-2007	11,3	11,3	0,0
W-2008	13,1	13,2	0,1
W-2009	15,0	14,6	-0,4
W-2010	13,9	11,7	-2,2
Mittel	12,40		
RMSE	1,22		
%-Fehler	9,82		

Angaben in t/ha			
Jahr	gemessen	berechnet	Fehler
P-2007	12,5	14,3	1,8
P-2008	15,2	14,7	-0,5
P-2009	16,1	15,3	-0,8
P-2010	14,1	13,0	-1,1
Mittel	14,48		
RMSE	1,15		
%-Fehler	7,91		

Bei der Modellierung der Sonnenblumenenerträge fallen die Jahre 2006 /2010-Werlte und 2007-Poppenburg mit Abweichungen von jeweils +1,6, -2,2 und +1,8 auf. Die Ergebnisse für die restlichen sieben modellierten Jahre liegen alle im Bereich von 0-8% Abweichung (Tabellen 4.2.7.1 und 4.2.7.2). Für beide Standorte wurde für das Jahr 2007, wie schon oben beschrieben, der Anfangsbodenwassergehalt mit 10% angepasst. In Werlte führte diese Anpassung zu einem sehr guten Modellierungsergebnis (0% Abweichung) in Poppenburg zu einer Abweichung von 14%. Was die Wasserversorgung über den Niederschlag betrifft, so war das Jahr 2007 für Sommerungen (Aussaattermine nach der Winterruheperiode), abgesehen vom überdurchschnittlich trockenen April,

ein gutes Jahr mit keinem Monat unter 75 mm Niederschlag und einer Niederschlagssumme von 510 mm (bis einschl. September).

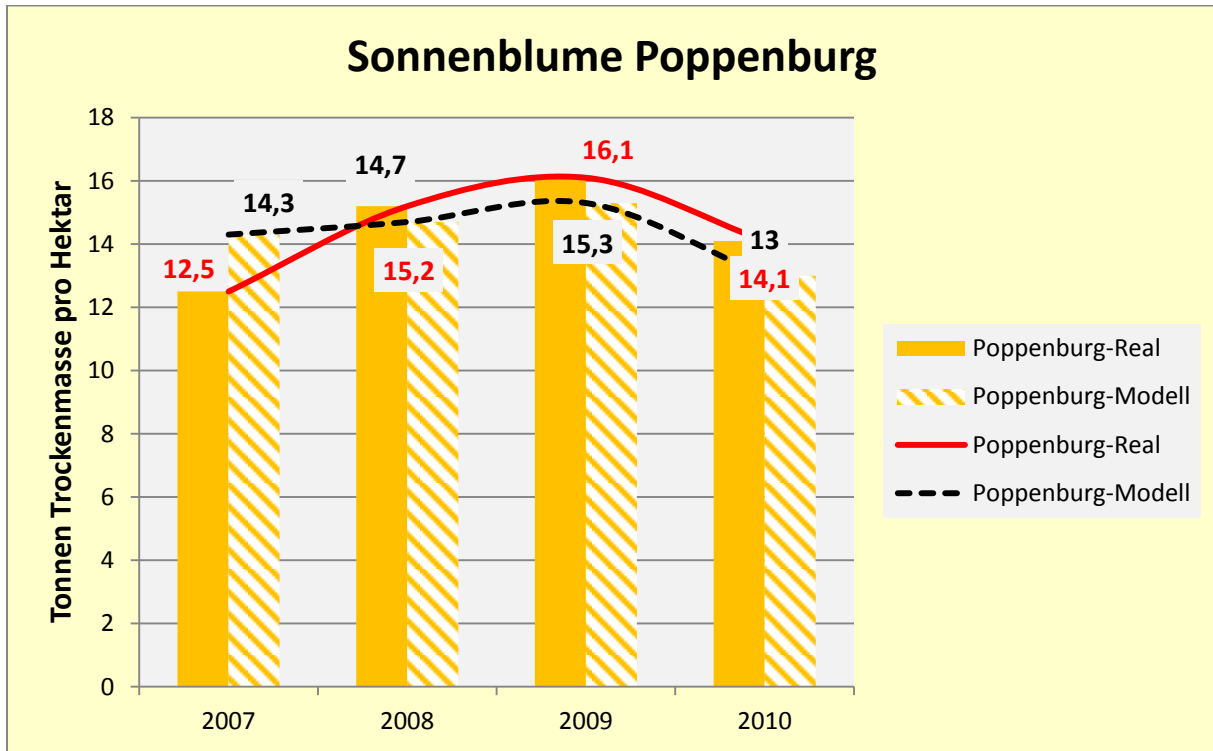


Abb.4.2.7.1(17): Säulendiagramm und Ertragskurven für Poppenburg für Sonnenblume

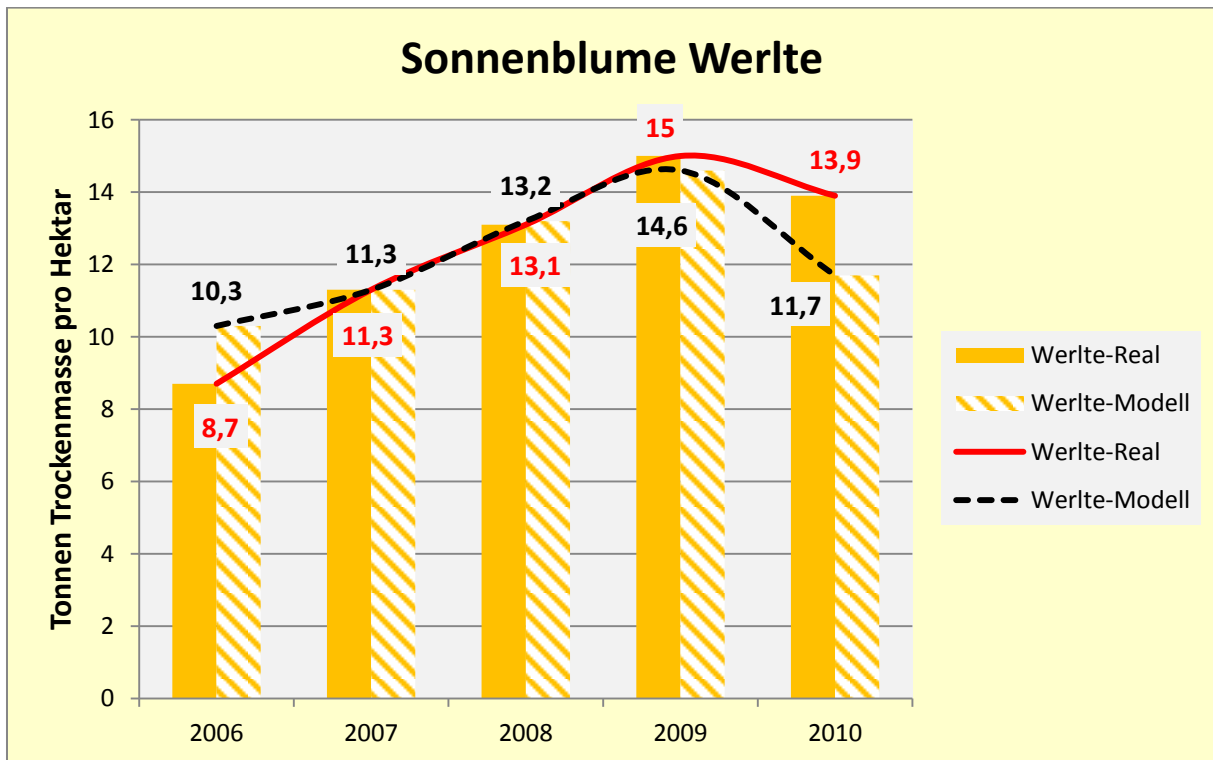


Abb. 4.2.7.2(18): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Werlte für Sonnenblume

Als weitere Erklärung für die Abweichung des Modells in diesem Jahr könnte der im Bericht der LWK-Niedersachsen (LWK, 2010) erwähnte Krankheitsbefall mit Sklerotinia (Weißstengeligkeit) und dadurch bedingten Lagerungsdruck zum Tragen gekommen sein. *Sklerotinia sclerotiorum* ist ein Pilzbefall, der durch erhöhte Feuchtigkeit im Bestand hervorgerufen werden kann.

Da ein Krankheitsbefall allerdings nicht die Modellunterschätzung aus 2010 (Werlte) erklärt, besteht hier noch Verbesserungsbedarf am Modell.

Wenn für das Jahr 2007 (Poppenburg) von einer Ertragsminderung durch Krankheitsbefall ausgegangen wird, so kann auch für die Sonnenblume gesagt werden, dass die Modellergebnisse im Verlauf der Einzeljahre die Klimavariabilität und deren Einfluss auf den Ertrag hinreichen genau nachzeichnen (Abb. 4.2.7.1 und 4.2.7.2).

4.2.8 Kalibrierung und Validierung Sorghum (*sorghum bicolor*)

Auch für die Einstellung und Überprüfung des Modells für die Modellierung von Zuckerhirse (*sorghum bicolor*) standen Ertragsdaten der Anbauversuche aus Poppenburg und Werlte zur Verfügung: In Poppenburg aus den Jahren 2007 bis 2010 und in Werlte aus den Jahren 2008 bis 2010. Für Poppenburg 2007 wurde wieder die Korrektur für den Anfangsbodenwassergehalt vorgenommen (10% der Θ_{FK}). In allen vier Jahren und für beide Standorte sind bei der Modellierung Abweichungen vom Mittelwert von 0,49 t/ha (Poppenburg) und 0,21 t/ha (Werlte) sowie prozentualen Abweichungen von unter 5% erzielt worden (Tabelle 4.2.8.1 und 4.2.8.2).

Auch für Sorghum wird im Verlauf der Einzeljahre die Klimavariabilität und ihr Einfluss auf den Ertrag hinreichen genau nachgezeichnet (Abb. 4.2.8.1 und 4.2.8.2).

Tabelle 4.2.8.1(6) und Tabelle 4.2.8.2(7): Sorghum Poppenburg (links) u. Werlte(rechts)

Jahr	Angaben in t/ha		
	gemessen	berechnet	Fehler
P-2007	15,0	15,5	0,5
P-2008	16,6	16,1	-0,5
P-2009	14,3	14,4	0,1
P-2010	14,1	13,0	-1,1
Mittel	15,00		
RMSE	0,49		
%-Fehler	3,27		

Jahr	Angaben in t/ha		
	gemessen	berechnet	Fehler
W-2008	16,5	16,6	0,1
W-2009	17	16,6	-0,4
W-2010	14,5	14,4	-0,1
Mittel	16,00		
RMSE	0,21		
%-Fehler	1,28		

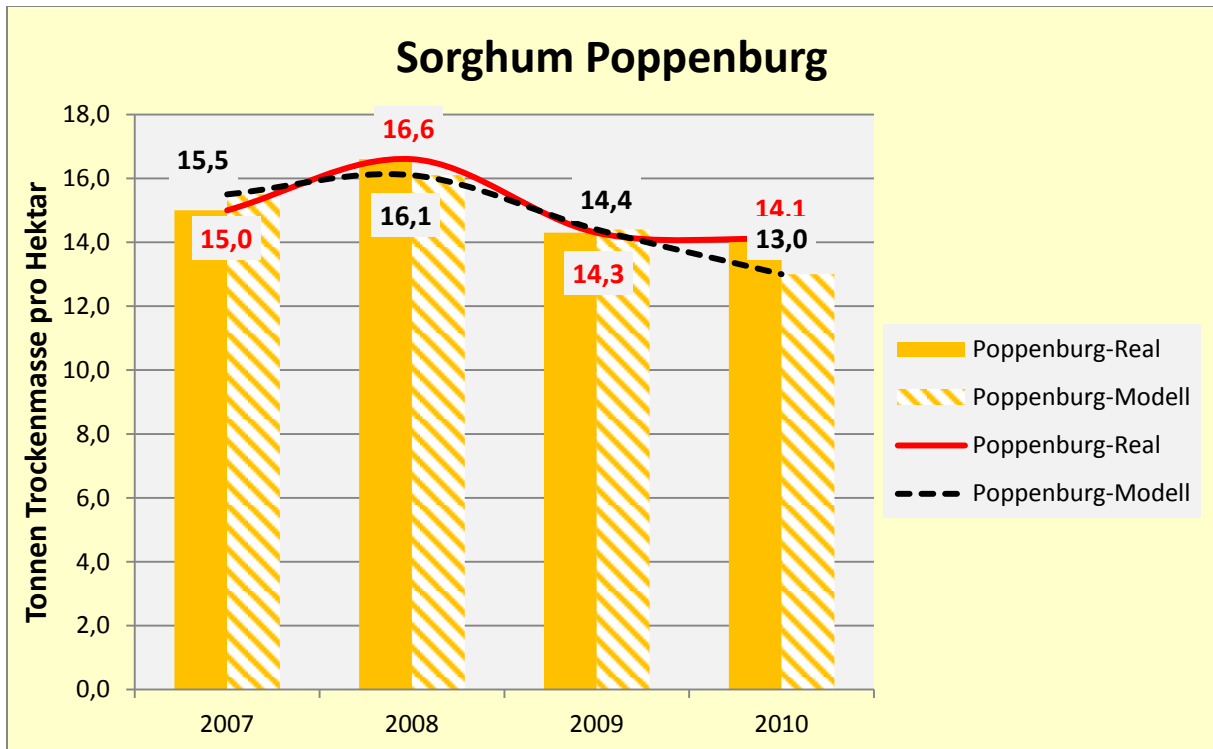


Abb. 4.2.8.1(19): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Poppenburg für Sorghum

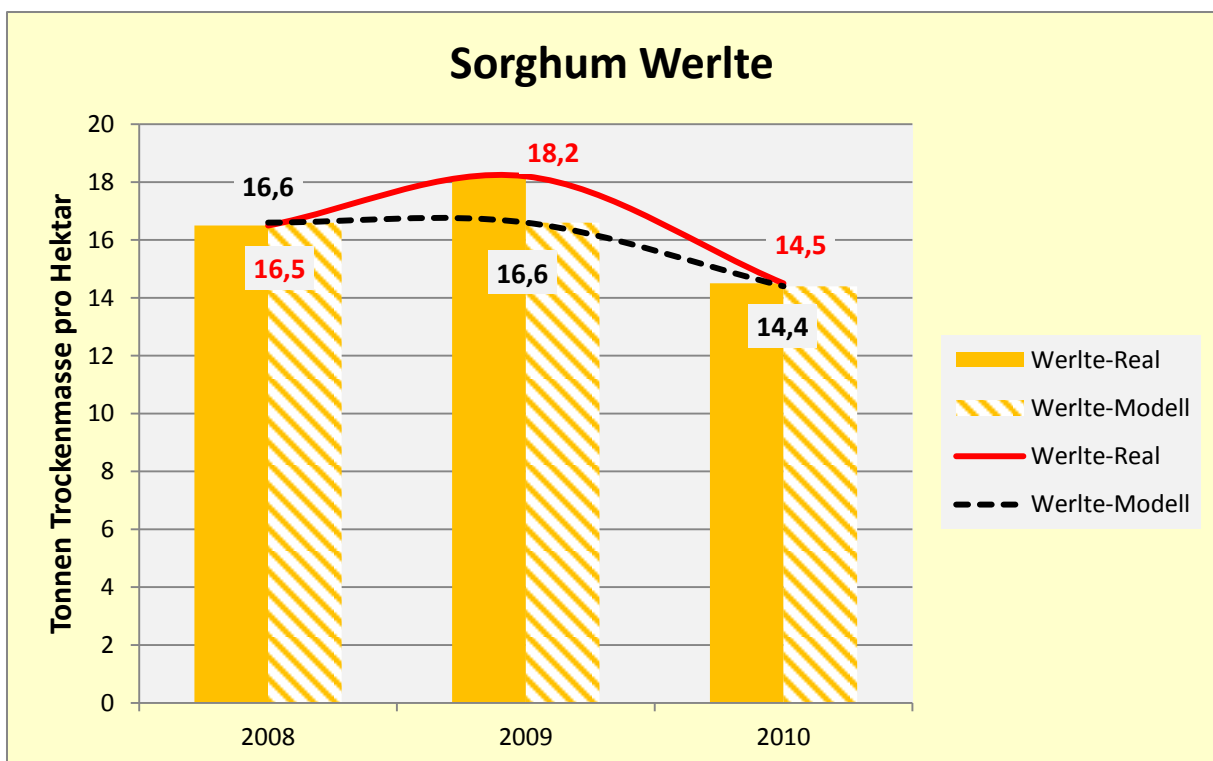


Abb. 4.2.8.2(20): Säulendiagramm und Ertragskurven Standort Werlte für Sorghum

5. Sensitivitätsanalyse

5.1 Die Eingangsdaten

Nachdem die Modelleinstellungen und -gleichungen anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Daten überprüft und ggf. korrigiert worden sind, wurde in einem weiteren Arbeitsschritt eine Sensitivitätsanalyse mit weiteren Klimadatenansätzen durchgeführt. Die hierbei bearbeiteten Klimadatenansätze sind langjährige Monatsmittelwerte von verschiedenen Klimastationen und aus verschiedenen Klimaregionen der Erde.

Da die Datensätze, die für die Modellüberprüfung herangezogen wurden, klimatisch betrachtet wenig heterogen sind, dient diese weitergehende Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung des Modells außerhalb seiner Entwicklungsumgebung. Fragestellungen waren hierbei u.a.: Wie reagiert das Modell auf hohe/niedrige Niederschläge, Luftfeuchtegehalte und Temperaturen? Als zusätzliche Orientierung wurden dieselben Daten noch mit dem Modell „AquaCrop“ (Steduto, et al., 2009) verarbeitet und die Ergebnisdatenansätze dann hinsichtlich der Erträge für Mais sowie für Kennwerte des Wasserverbrauchs (Evapotranspiration) miteinander verglichen.

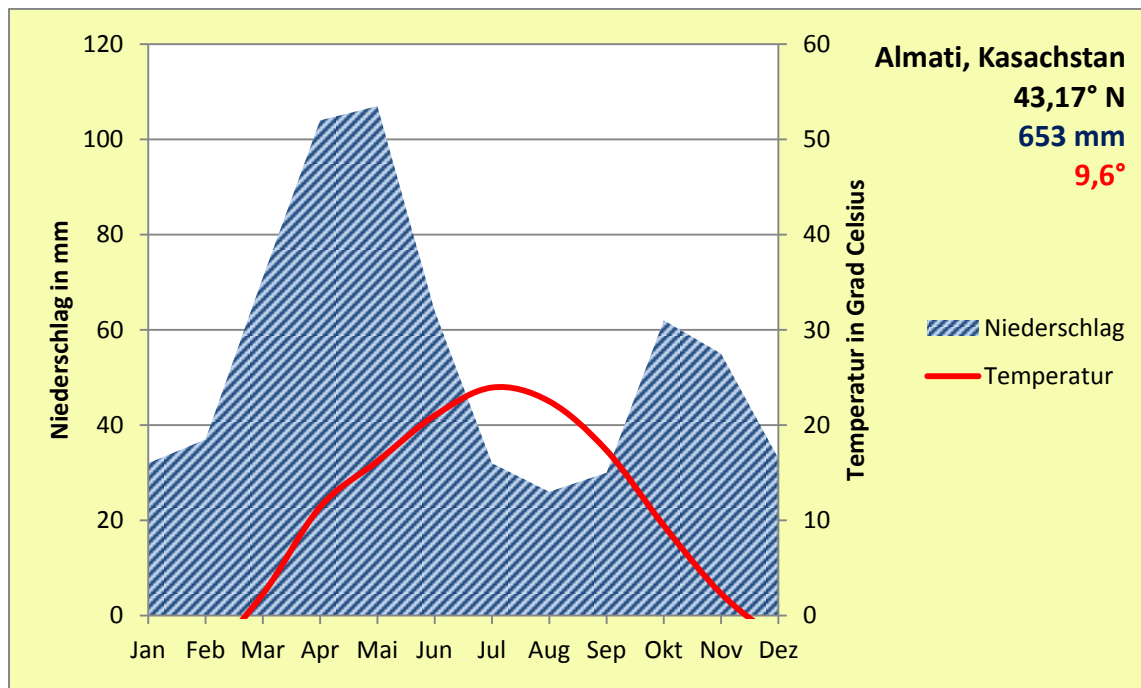


Abb. 5.1(21): Klimadiagramm Almati, Kasachstan;
 kontinentales Steppenklima mit Niederschlagsmaxima im Frühjahr und Herbst sowie
 Sommertrockenheit. Jahresniederschlag 653 mm, Jahresmitteltemperatur 9,6° C

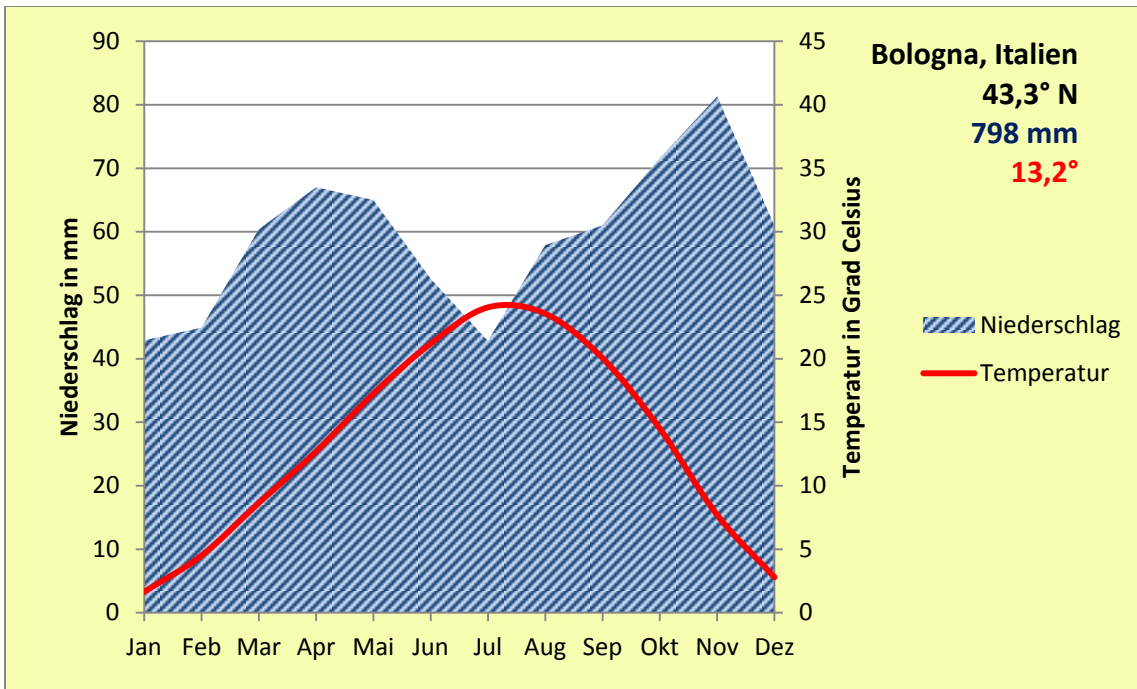


Abb. 5.2(22): Klimadiagramm Bologna, Italien;
 Mittelmeerklima mit Niederschlagsmaxima im Frühjahr und Herbst mit schwach ausgeprägter Sommertrockenheit. Jahresniederschlag 798 mm, Jahresmitteltemperatur 13,2° C

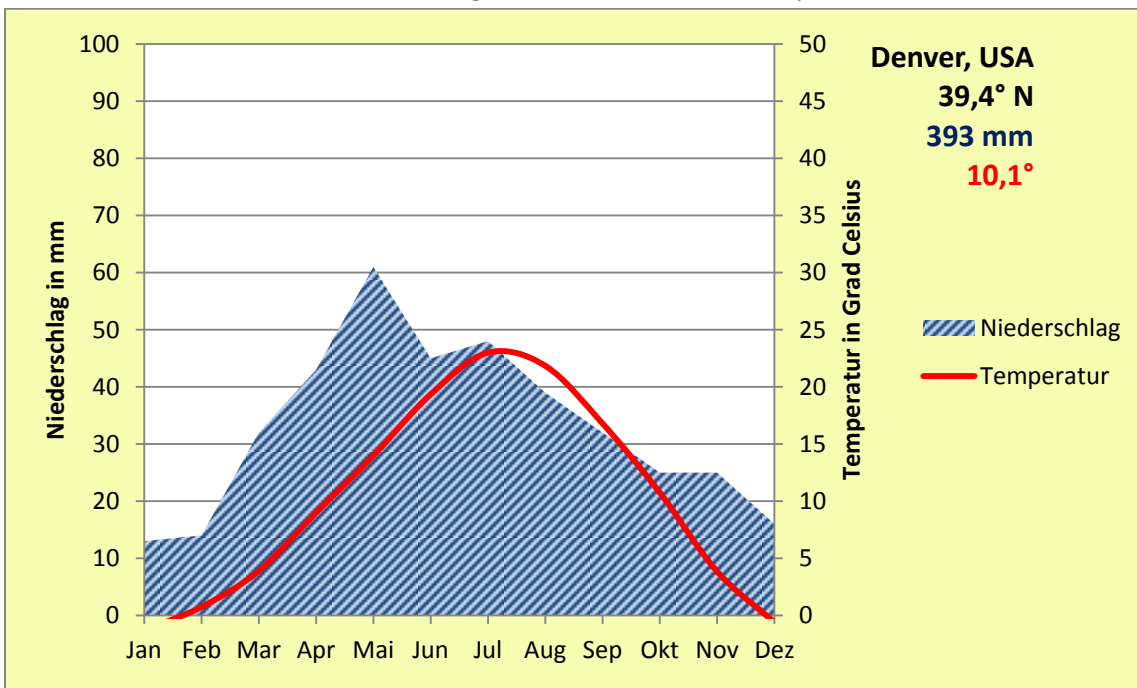


Abb. 5.3(23): Klimadiagramm Denver, USA;
 kontinentales Steppenklima mit Niederschlagsmaximum im Frühjahr sowie schwach ausgeprägter Sommertrockenheit. Jahresniederschlag 393 mm, Jahresmitteltemperatur 10,1° C

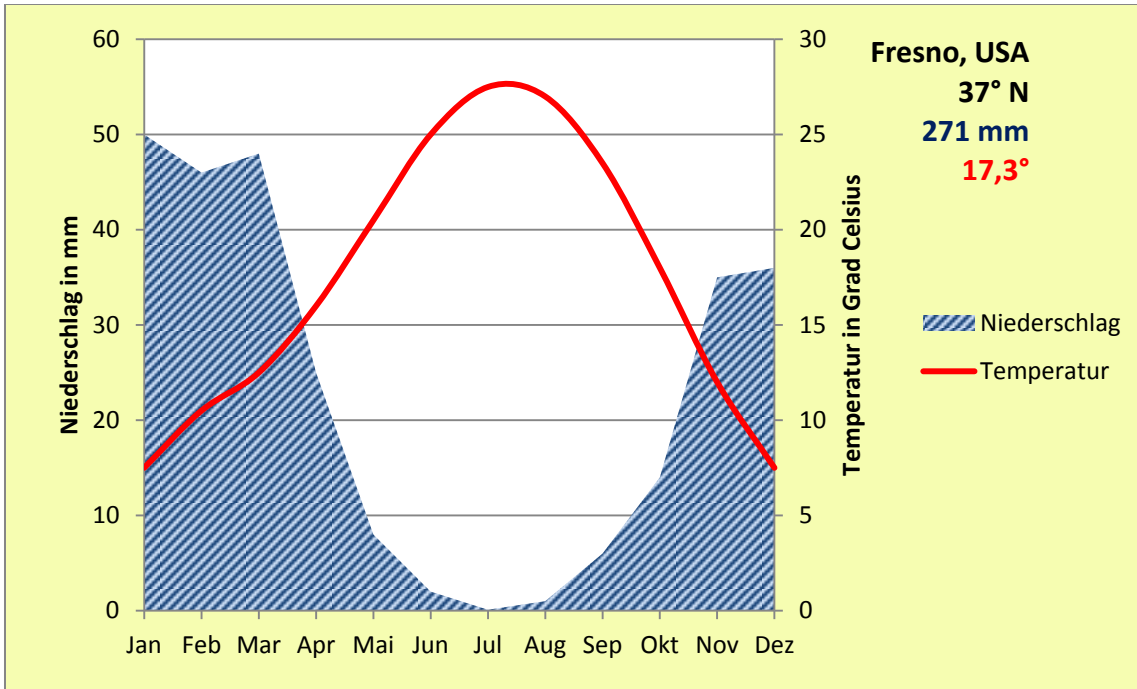


Abb. 5.4(24): Klimadiagramm Fresno, USA;
Mittelmeerklima mit stark ausgeprägter Sommertrockenheit und Winterniederschlagsmaximum.
Jahresniederschlag 271 mm, Jahresmitteltemperatur 17,3° C

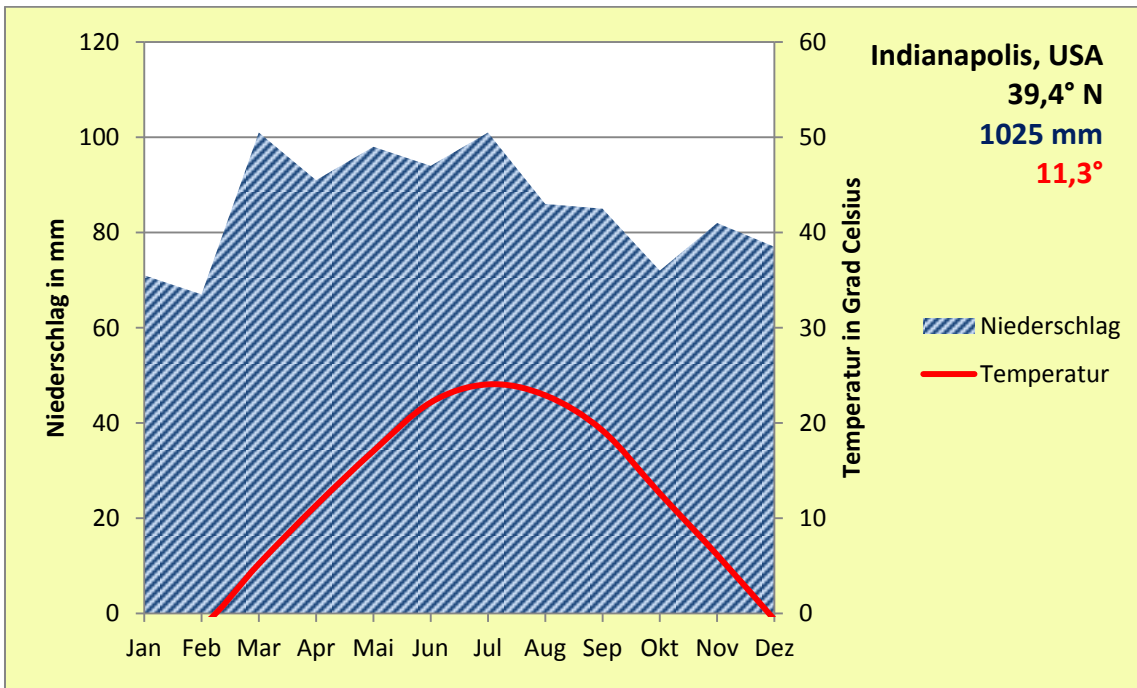


Abb. 5.5(25): Klimadiagramm Indianapolis, USA;
kontinental geprägtes Klima der Mittelbreiten mit ganzjährig hohen Niederschlägen.
Jahresniederschlag 1025 mm, Jahresmitteltemperatur 11,3° C

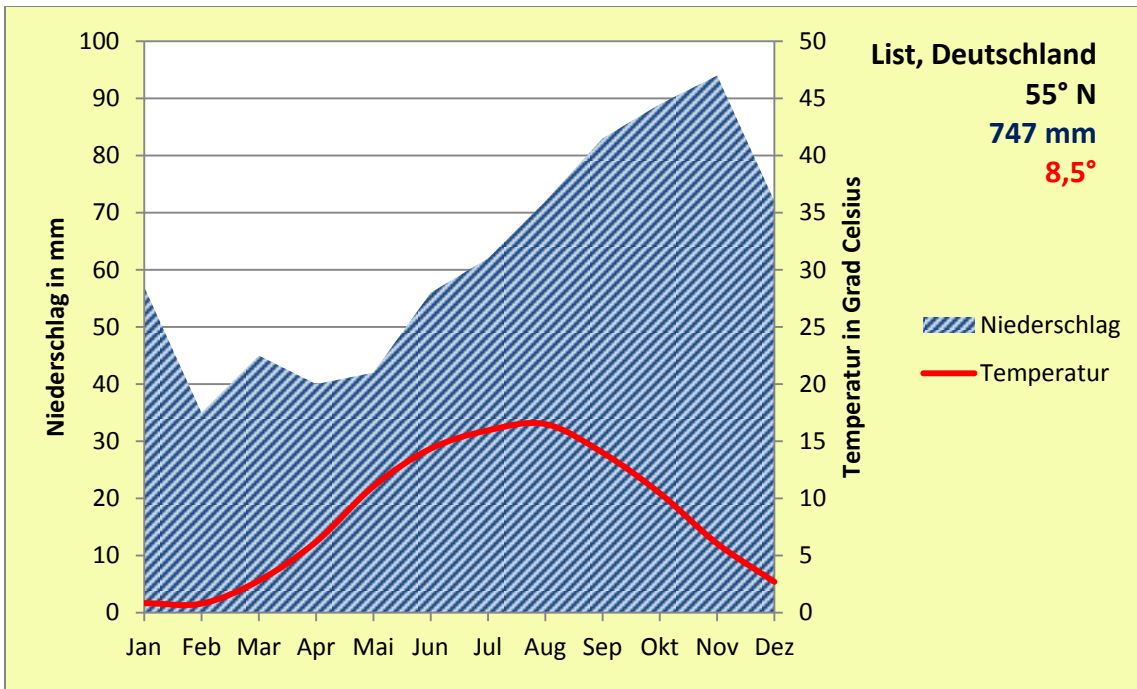


Abb. 5.6(26): Klimadiagramm List, Deutschland;
 humides Mittelbreitenklima mit Niederschlagsmaximum im Herbst/Winter.
 Jahresniederschlag 747 mm, Jahresmitteltemperatur 8,5° C

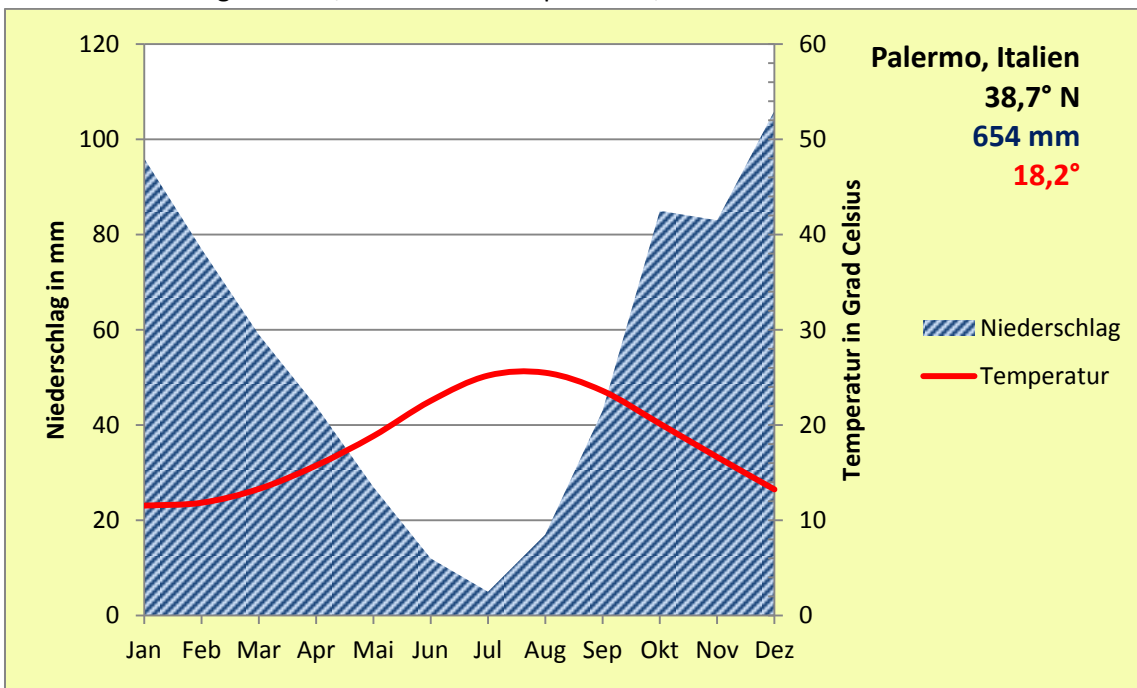


Abb. 5.7(27): Klimadiagramm Palermo, Italien;
 Mittelmeerklima mit stark ausgeprägter Sommertrockenheit und Niederschlagsmaximum im Winter.
 Jahresniederschlag 654 mm, Jahresmitteltemperatur 18,2° C

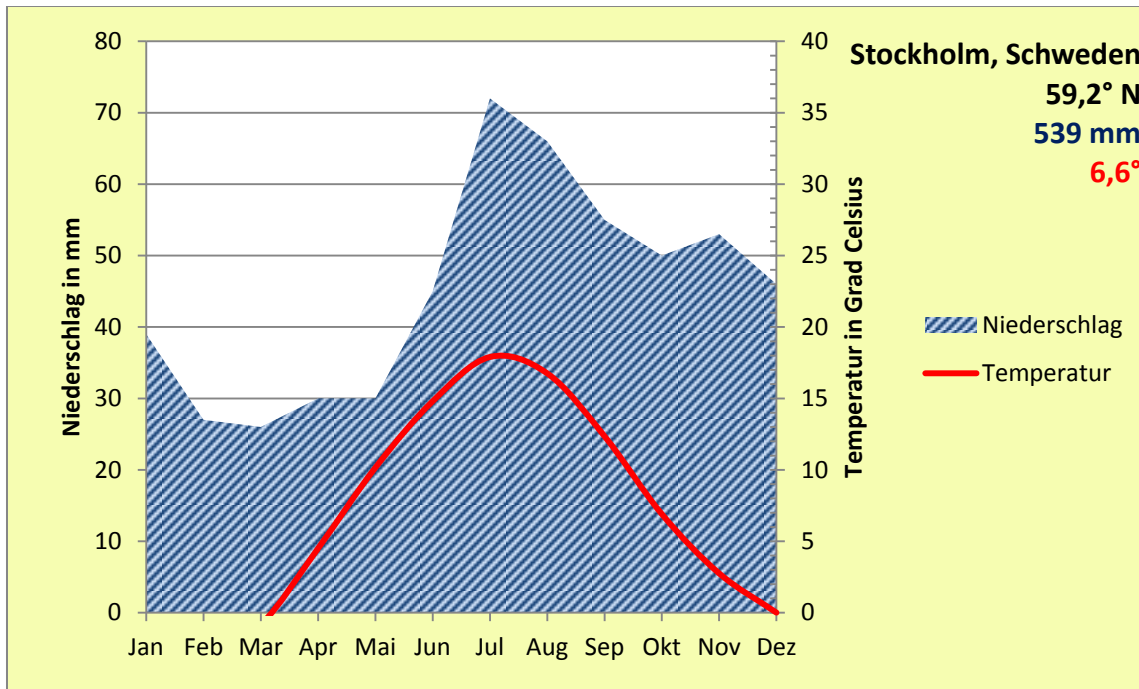


Abb. 5.8(28): Klimadiagramm Stockholm, Schweden;
Kühl-gemäßigtes Klima der Mittelbreiten mit Niederschlagsmaximum im Sommer und Herbst.
Jahresniederschlag 539 mm, Jahresmitteltemperatur 6,6° C

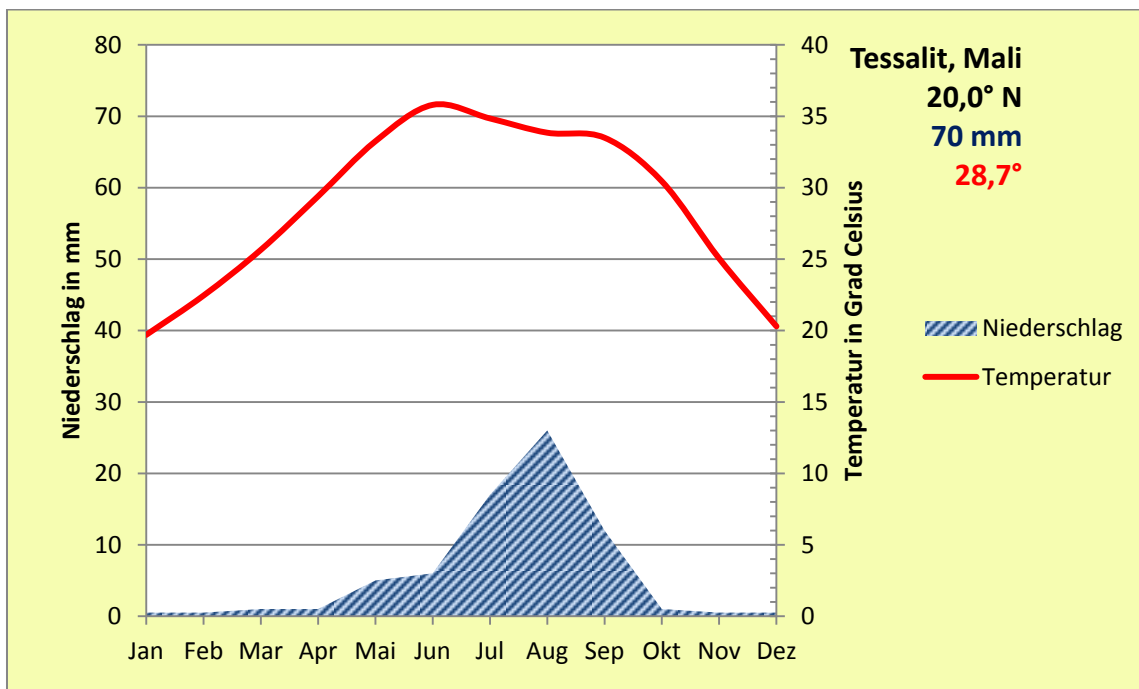


Abb. 5.9(29): Klimadiagramm Tessalit, Mali;
arides Tropenklima mit Niederschlagsmaximum im Sommer, sonst ganzjährig Trockenheit.
Jahresniederschlag 70 mm, Jahresmitteltemperatur 28,7° C

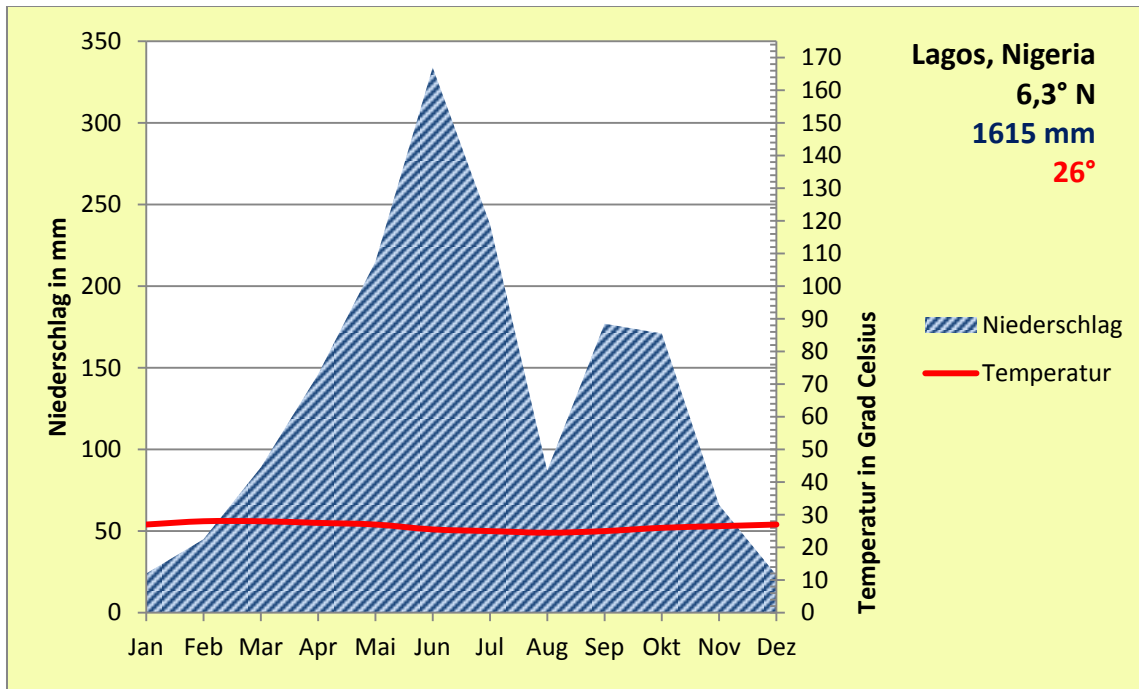


Abb. 5.10(30): Klimadiagramm Lagos, Nigeria; humides Tropenklima mit Niederschlagsmaxima im Frühjahr und Herbst, sowie ganzjährig hohem Temperaturniveau. Jahresniederschlag 1615 mm, Jahresmitteltemperatur 26° C

Insgesamt wurden für die Sensitivitätsanalyse Klimadaten von zehn Klimastationen aus verschiedenen Klimazonen verwendet (Abb. 5.1 – 5.10 sowie Tabellen 12.1-12.3 und Abb. 12.1 im Anhang). Die Klimadaten stammen von einer Klimadatenbank (wetter.com-AG, 2012) und beziehen sich auf die Klimahauptperiode 1961 – 1990 oder eine mindestens 20-jährige Zeitreihe. Die aus den Klimadaten erstellten Klimadiagramme sind grafisch so dargestellt, dass durch eine Verschiebung der Achsenwerte Niederschlag gegenüber Temperatur um Faktor 2:1 humide und aride Zeiträume aus den beiden Kurven abgelesen werden können (Walter & Lieth, 1967).

Als Bodendaten wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit jeweils drei identische Bodenarten aus der KA5 (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden, 2005) verwendet: Schluff (uu), toniger Lehm (lt) und Sand (ss). Die Kennwerte für die drei Bodenarten hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 5.1.1 aufgeführt. Für die im Modell BioSTAR verwendeten van Genuchten-Parameter siehe Tabelle 5.1.2.

Als Modellparameter für die Kultur Mais wurden Phänologieeinstellungen für eine früh reifende Silomaisorte (Siloreifezahl 220) gewählt. Eine derartige Sorte benötigt unter norddeutschen Klimabedingungen etwa 60 Tage von Aussaat bis Blüte und noch einmal 70 Tage bis zur Siloreife.

Als Aussattermin wurde für alle Standorte (mit Ausnahme von Stockholm) der 26. April gewählt, der Erntetermin am 2. September. Am Standort Stockholm muss die Simulation aus Temperaturgründen (Monatstemperaturmittel ist im April zu niedrig) mit dem Monat Mai beginnen und endet entsprechend fünf Tage später. Die Abfolge der Orte in Tabelle 5.2.1.1 ist entsprechend ihrer

klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Simulationsperiode geordnet, mit Lagos als einzigem Ort mit einer positiven KWB an erster Stelle und Fresno mit einer KWB von -1106 mm an letzter Stelle.

Tabelle 5.1.1(8): Für das Modell AquaCrop in der Sensitivitätsanalyse verwendete Bodenparameter

Einheit	Volumen %			mm/m	cm	mm/Tag
Bodenart	PWP (pF 4,2)	FK (pF 1,8)	GPV	nFK	Profil	Ks
uu	12,7	35,6	42	229	200	33,8
lt	22,6	33,3	46	107	200	55
ss	2,1	13,5	38,8	114	200	512

Tabelle 5.1.2(9): van Genuchten-Parameter für Sensitivitätsanalyse (Modell BioSTAR)

	Bodenart		
	uu	ss	lt
k0 [cm/Tag]	33,8	512,1	52,0
θ [Vol. %]	12,7	2,07	20,9
θ_r [Vol. %]	0	0	11,5
θ_s [Vol. %]	40,3	38,79	43,3
α	0,014	0,264	0,034
n	1,213	1,352	1,194
x	-0,561	-0,594	0,000
m	0,176	0,260	0,163
GPV [Vol. %]	42	38	46
PWP [Vol. %]	12,7	2,07	20,89
FK [Vol. %]	35,6	13,5	34,5

5.2 Modellergebnisse

5.2.1 Die Ertragshöhen

Tabelle 5.2.1.1(10): Berechnete Maiserträge (in Tonnen/ha) für die 10 Orte und 3 Bodenarten jeweils für das Modell BioSTAR (BS) und das Modell AquaCrop (AC)

Ort	Boden	BS t/ha	AC t/ha	Boden	BS t/ha	AC t/ha	Boden	BS t/ha	AC
Lagos	uu	30,6	29,0	lt	30,6	29,0	ss	30,6	29,0
List	uu	27,7	13,5	lt	22,9	9,1	ss	23,4	11,2
Stockh.	uu	24,0	17,4	lt	18,8	8,4	ss	19,2	11,2
Indianap.	uu	25,3	28,2	lt	20,4	16,6	ss	20,7	19,7
Bologna	uu	19,3	25,0	lt	13,9	9,9	ss	14,3	12,8
Almati	uu	18,9	22,1	lt	13,9	9,8	ss	13,7	11,9
Denver	uu	19,0	19,0	lt	13,4	5,4	ss	13,9	7,5
Palermo	uu	12,9	17,4	lt	6,8	6,2	ss	7,0	7,8
Tessalit	uu	5,7	10,5	lt	1,9	3,5	ss	2,0	2,4
Fresno	uu	9,0	12,0	lt	3,9	3,3	ss	4,2	4,9

Tabelle 5.2.1.2(11): Potenzielle Evapotranspiration in mm nach Penman-Monteith für die zehn Standorte im Simulationszeitraum.

Ort	Boden- und modellunabhängige Et _o nach Penman-Monteith
Lagos	602 mm
List	554 mm
Stockholm	597 mm
Indianapolis	776 mm
Bologna	756 mm
Almati	845 mm
Denver	859 mm
Palermo	879 mm
Tessalit	1292 mm
Fresno	1148 mm

Bei den modellierten Ertragsdaten lässt sich für beide Modelle und alle drei Bodenarten ein Abfall der Ertragshöhe von den humiden zu den ariden Standorten feststellen (Tabelle 5.2.1.1). Ausnahme bilden die Modellergebnisse von AquaCrop (AC) für List und Stockholm. Insbesondere für List prognostiziert AquaCrop einen deutlich geringeren Ertrag als das Modell BioSTAR (BS) (13,5 vs. 27,7 t/ha).

Tabelle 5.2.1.3(12): aktuelle Evapotranspiration (E_t) in mm nach Modellberechnungen für die zehn Standorte im Simulationszeitraum (uu = Schluff, lt = lehmiger Ton, ss = Sand).

Ort	E_t für Boden uu in mm		E_t für Boden lt in mm		E_t für Boden ss in mm	
	BS	AC	BS	AC	BS	AC
Lagos	577	566	577	556	577	544
List	416	477	346	411	353	417
Stockh.	412	503	331	400	337	400
Indianap.	649	699	526	576	535	573
Bologna	508	607	372	414	381	428
Almati	533	639	387	434	379	441
Denver	493	591	352	364	362	379
Palermo	375	457	214	225	218	241
Tessalit	377	407	191	182	199	174
Fresno	340	378	175	140	186	161

Die Erklärung für das Modellverhalten bei diesen beiden Ergebnissen liegt in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Lufttemperatur der beiden Modelle für die Pflanzenentwicklung. Für AquaCrop wurde die Einstellung für den modellinternen Temperaturstresskoeffizienten " K_{s_b} " beim voreingestellten Wert von 15° GDD (*growing degree days*) (siehe 3.6.1) belassen. Der Koeffizient K_{s_b} gibt den Temperaturpunkt an, ab dem die Pflanze Temperaturstress bei ihrer Entwicklung erfährt. Für die temperaturabhängige Fotosyntheseleistung und die Entwicklungsgeschwindigkeit von Mais wurden im Modell BioSTAR Reaktionskurven gewählt, bei denen erst bei 25° C eine volle Fotosyntheseleistung und Pflanzenentwicklung gegeben ist, also minus einer Basistemperatur von 8° C ein GDD-Wert von 17° . Um das Modell AquaCrop dahingehend anzupassen, dass auch bei den (im Kontext der anderen Standorte gesehenen) niedrigen Monatsmitteltemperaturen in List und Stockholm noch ausreichend hohe Biomasseakkumulationsraten erreicht werden, müsste der Koeffizient K_{s_b} im Modell AquaCrop auf mindestens 12° C abgesenkt werden. Dies erscheint jedoch ein kaum realistischer Wert für eine wärmeliebende Pflanze wie den Mais und würde die Diskrepanz zwischen den Modelleinstellungen für diesen Parameter noch weiter vergrößern (17° vs. 12°).

Die starke Reaktion von AquaCrop auf den Koeffizienten K_{s_b} im Falle von List und Stockholm zeigt sich im Modellausgabewert "St-Bio", der den Temperaturstress (Kältestress) der Pflanze als Prozentwert wiedergibt. Für Almati und Denver liegt dieser Wert z.B. bei jeweils 15,9 und 16,2%, bei List und Stockholm bei jeweils 44,9 und 55,1%. Somit können die niedrigen Ertragswerte des Modells AquaCrop für List und Stockholm über den Koeffizienten K_{s_b} erklärt werden.

Zur Veranschaulichung ist in Gleichung 5.2.1.1 die Biomasseakkumulationsgleichung des Modells AquaCrop dargestellt.

Gleichung für oberirdische Biomasseakkumulation im Modell AquaCrop

Gleichung 5.2.1.1

$$B = K_{S_b} * WP^* \Sigma (Tr / ET_o)$$

Wobei:

B : Oberirdische Biomasse

K_{S_b} : Lufttemperatur-Stresskoeffizient

WP^* : an Bodenverhältnisse und CO_2 -Gehalt (atm.) angepasster Wasserproduktivitätsfaktor

Tr : Transpirationsrate

ET_o : Potenzielle Evapotranspiration

Tabelle 5.2.1.4(13): Klimatische Wasserbilanz (KWB) in der Simulationsperiode für die zehn Standorte

Ort	KWB in mm
Lagos	279
List	-339
Stockholm	-399
Indianapolis	-468
Bologna	-581
Almati	-582
Denver	-663
Palermo	-862
Tessalit	-895
Fresno	-1106

Für den Schluffboden liegen die Ertragswerte des Modells AquaCrop für die Standorte Indianapolis, Bologna, Almati, Palermo, Tessalit und Fresno über denen vom Modell BioSTAR und in Denver gleichauf. Für den immerfeuchten Tropenstandort Lagos berechnen beide Modelle einen etwa gleich hohen Ertrag (30,6 vs. 29 t/ha) für alle drei Bodenarten.

Für den Lehm- und den Sandboden berechnet BioSTAR, mit Ausnahme der Standorte Tessalit und Fresno, höhere Erträge als das Modell AquaCrop. Für den Standort Denver ergibt sich überraschenderweise eine besonders große Diskrepanz bei den Ertragshöhen (> 5 t/ha). Überraschend, da die Modellierung für den Schluffboden eine identische Ertragshöhe für beide Modelle ergeben hatte (19 t/ha).

Das Modell BioSTAR generiert für Almati und Denver für die Böden Sand und Lehm einen ähnlich hohen Ertrag, der um den Wert 13,5 t/ha schwankt. Auch die Evapotranspirationshöhen sind für beide Standorte mit 362 mm und 352 mm (Denver) sowie 379 mm und 387 mm (Almati) auf einem ähnlichen Niveau. Anders hingegen bei AquaCrop, wo die ET_a zwischen den beiden Standorten bei 379 mm und 364 mm (Denver) bis 441 mm und 434 mm (Almati) eine doppelt so hohe Diskrepanz aufweist. Deutlich wird dies an dem von AquaCrop generierten Parameter der „Wasserproduktivität“, er liegt für den Sand- bzw. den Lehmboden für Denver bei 2,38 und 1,94 kg/m^3 und für Almati bei 2,9 und 2,5 kg/m^3 .

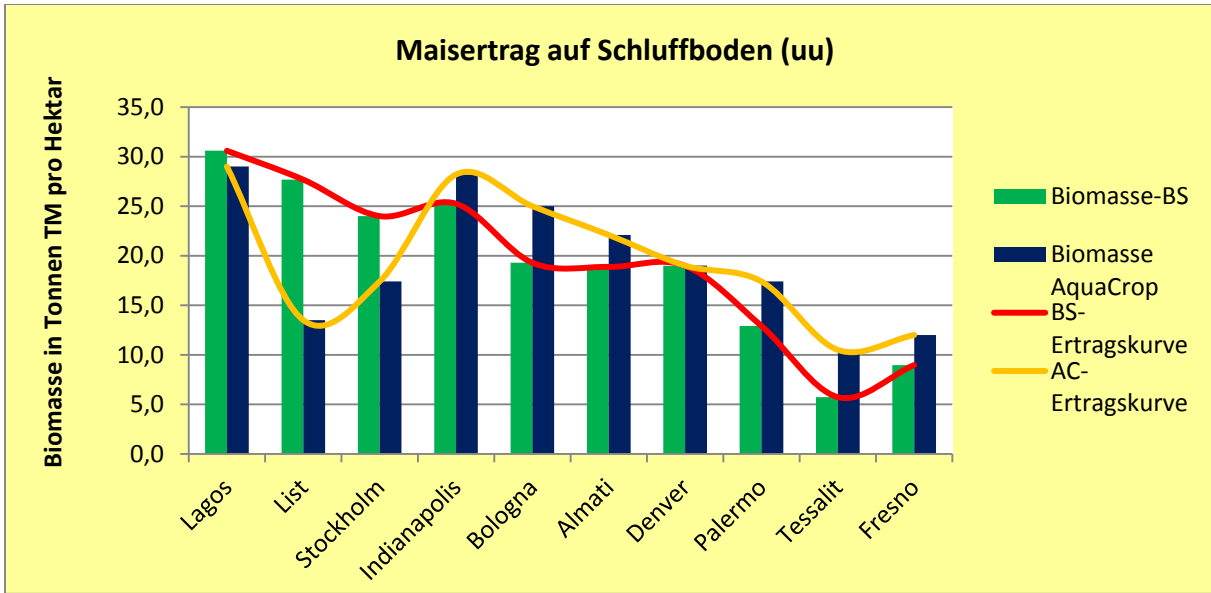


Abb. 5.2.1.1(31): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Schluffboden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.

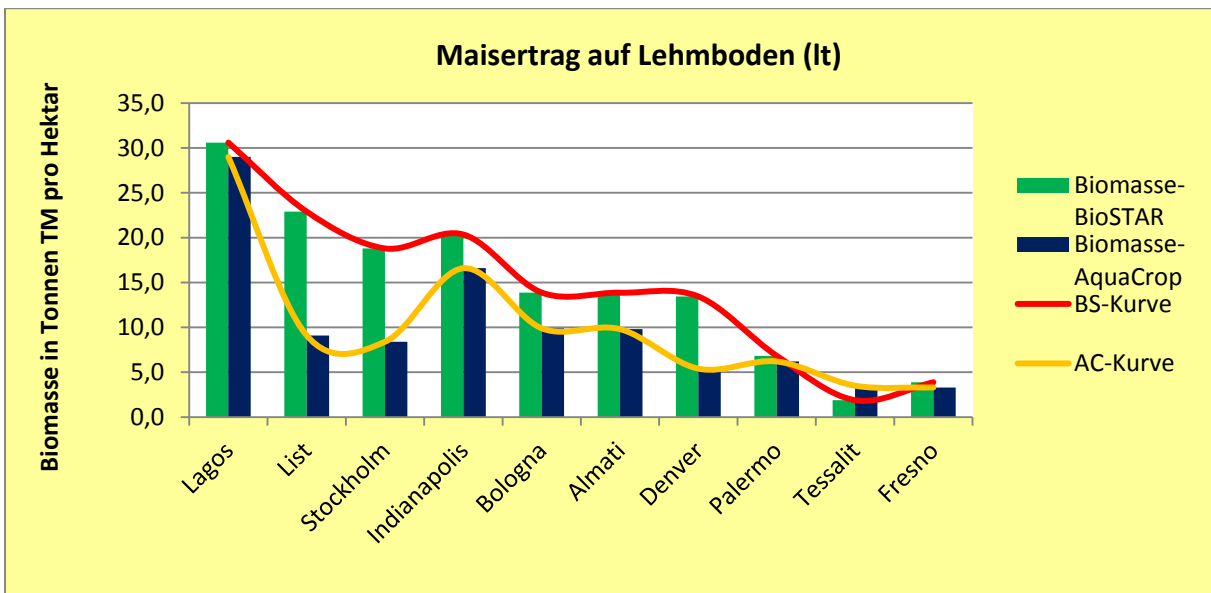


Abb. 5.2.1.2(32): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Lehm Boden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.

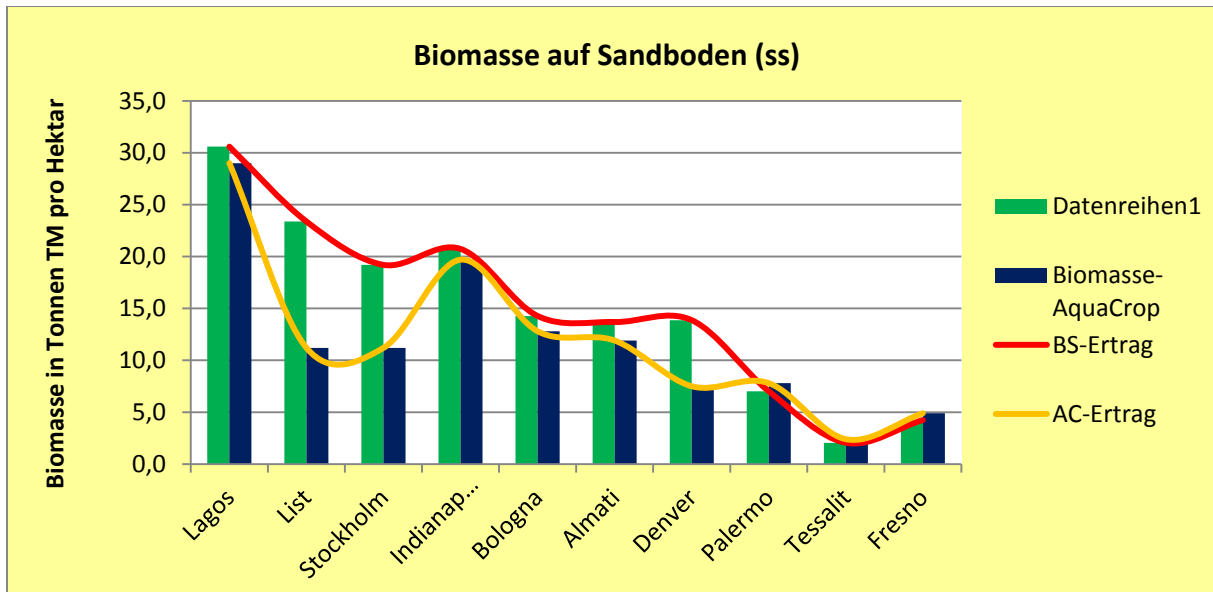


Abb. 5.2.1.3(33): Maisertrag (Tonnen Trockenmasse pro Hektar) auf Sandboden für die zehn Standorte berechnet jeweils mit BioSTAR und AquaCrop.

5.2.2 Die aktuellen Verdunstungshöhen (E_t)

Hinsichtlich der Berechnung der tatsächlichen Evapotranspirationsraten (E_t) stimmen beide Modelle weitestgehend miteinander überein. Auch wenn für einige der zehn Standorte Differenzen bei der Berechnung der E_t auftreten (Tabelle 5.2.1.3), die bei bis zu maximal +22% liegen (Stockholm, Palermo), folgen die E_t -Werte beider Modelle für alle drei Böden dem gleichen Trend, wie aus Abbildungen 5.2.2.1 bis 5.2.2.3 gut zu ersehen ist.

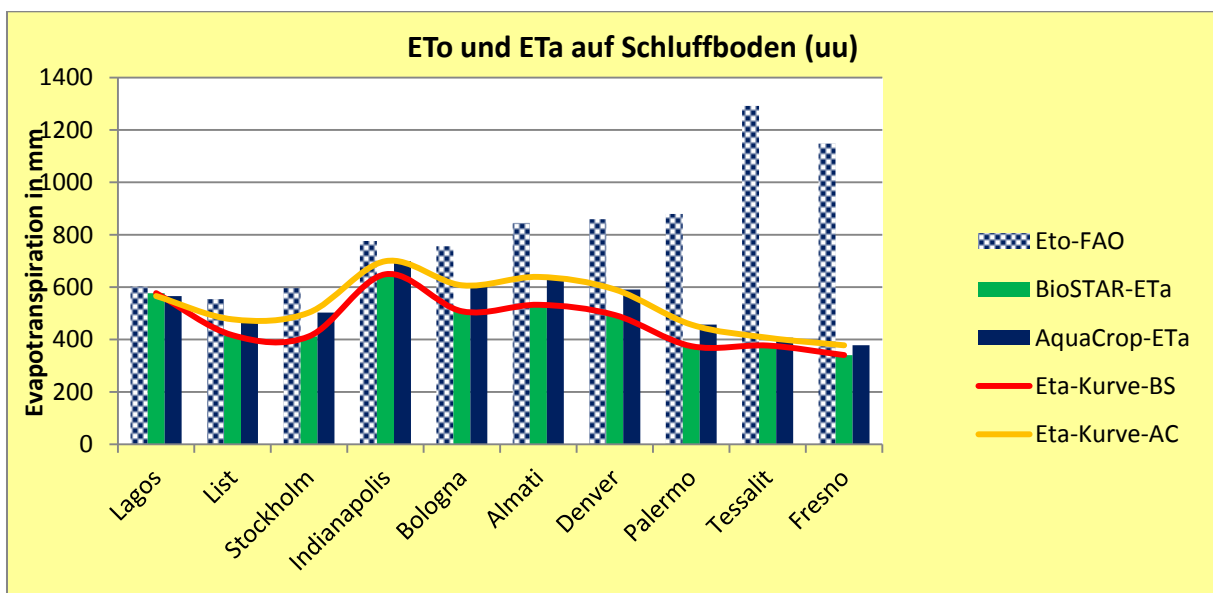


Abb. 5.2.2.1(34): Potenzielle Evapotranspiration (ET_0) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Schluffboden

Die Werte der nach Penman-Monteith berechneten ET_0 zeigen einen von links nach rechts - also einen von humid nach arid - ansteigenden Trend, bei dem die Diskrepanz zwischen ET_0 und ET_a stetig größer wird.

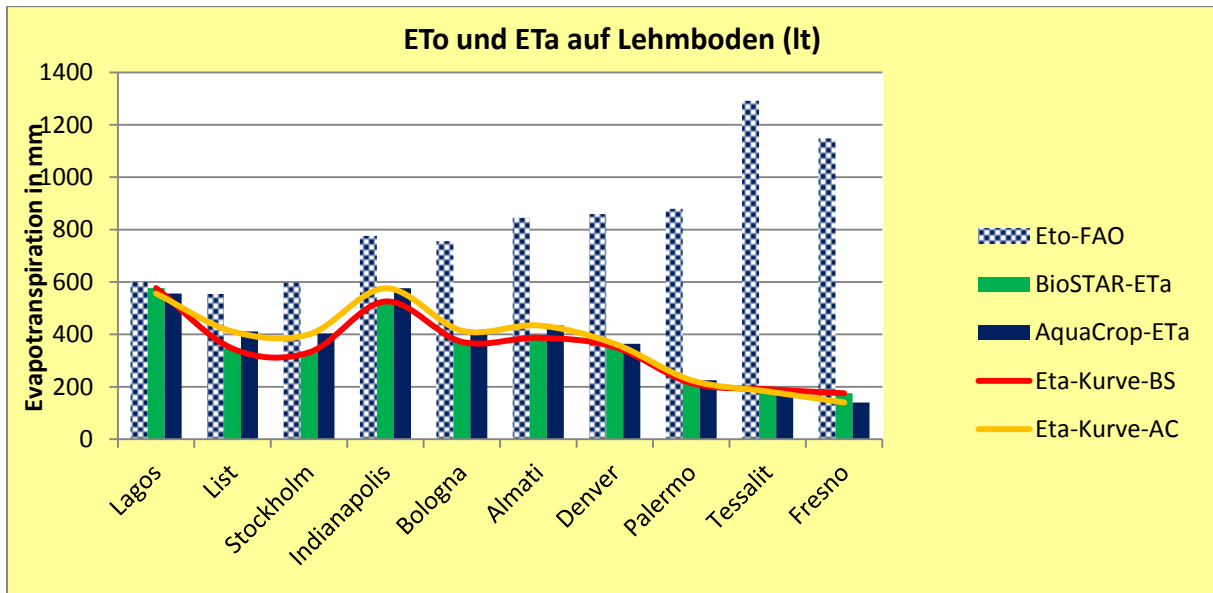


Abb. 5.2.2.2(35): Potenzielle Evapotranspiration (ET_0) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Lehmboden

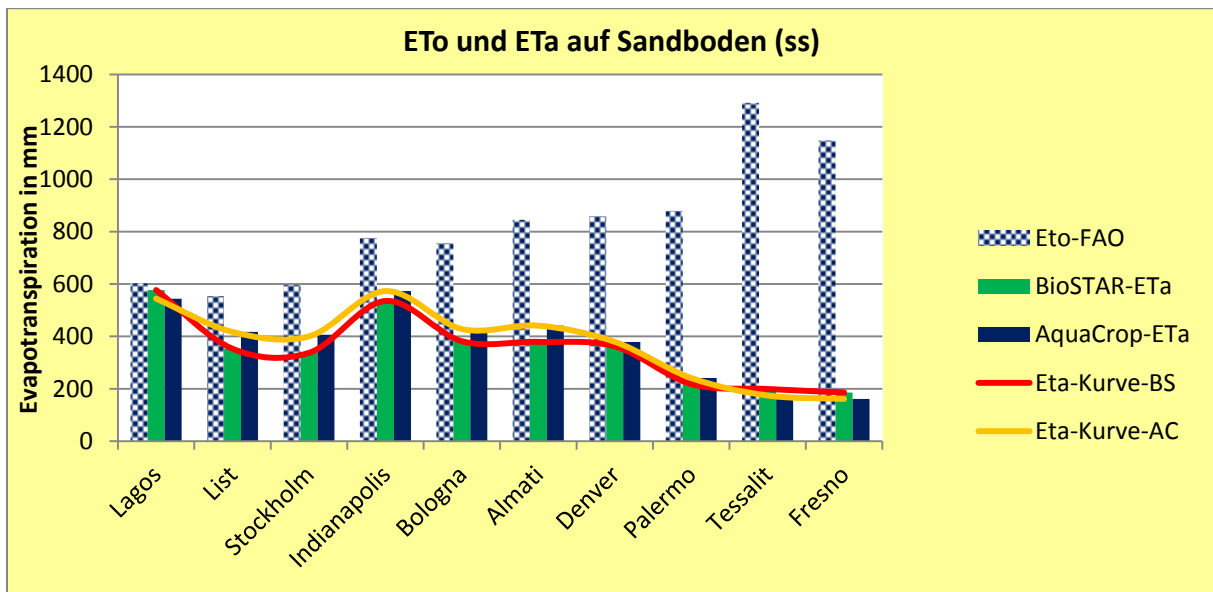


Abb. 5.2.2.3(36): Potenzielle Evapotranspiration (ET_0) und die von den Modellen generierte aktuelle Evapotranspiration auf Sandboden

In Lagos sind sowohl Temperatur als auch Luftfeuchte hoch, daher liegen hier relativ geringe Verdunstungsraten vor. In Stockholm und List führen relativ niedrige Temperaturen sowie eine mittlere bis hohe Luftfeuchte zu niedrigen Verdunstungswerten. In Indianapolis führen hohe Sommertemperaturen und viel Niederschlag zu hohen Verdunstungsraten. Von Bologna über Almati,

Denver, Palermo, Tessalit nach Fresno sinkt das Wasserdargebot, und somit auch die ET_a . Steigende Temperaturen und geringe Luftfeuchtegehalte führen zu hohen potenziellen Verdunstungswerten.

5.2.3 Der Evapotranspirationskoeffizient

Der Evapotranspirationskoeffizient (ETK) ist der Kehrwert der Wassernutzungseffizienz (*engl. water use efficiency*) und ist definiert als Liter verdunstetes plus transpiriertes Wasser pro kg Trockenmasse (Ehlers, 1996)

Der ETK verläuft für den Schluffboden (großes Wasserdargebot) bei beiden Modellen ähnlich (Abb. 5.2.3.1). Der Knick der AquaCrop-Kurve bei List und Stockholm erklärt sich durch die oben beschriebenen niedrigen Ertragswerte (ETK = Liter Wasser pro kg Trockenmasse). Für Tessalit lässt sich zwar eine optisch starke Abweichung der Modelle ersehen, diese relativiert sich jedoch, wenn man berücksichtigt, wie niedrig der Ertrag (siehe oben) und wie hoch die Verdunstungsraten für diesen Standort sind.

Für den Lehm- und den Sandboden weichen die Kurven auch im Mittelbereich stärker voneinander ab und es ergibt sich eine neue "Beule" für den Standort Denver (Abb. 5.2.3.2 und 5.2.3.3). Diese wird durch die geringe Biomassebildung im Falle des Lehm- und Sandbodens (siehe oben) auf diesem Standort verursacht.

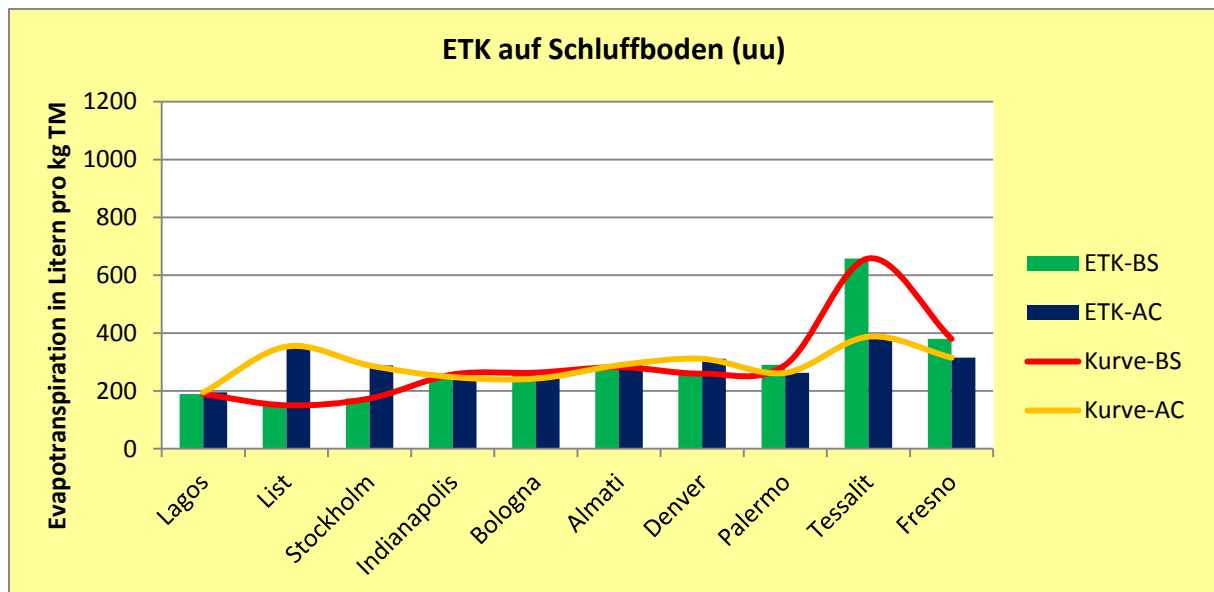


Abb. 5.2.3.1(37): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Schluffboden

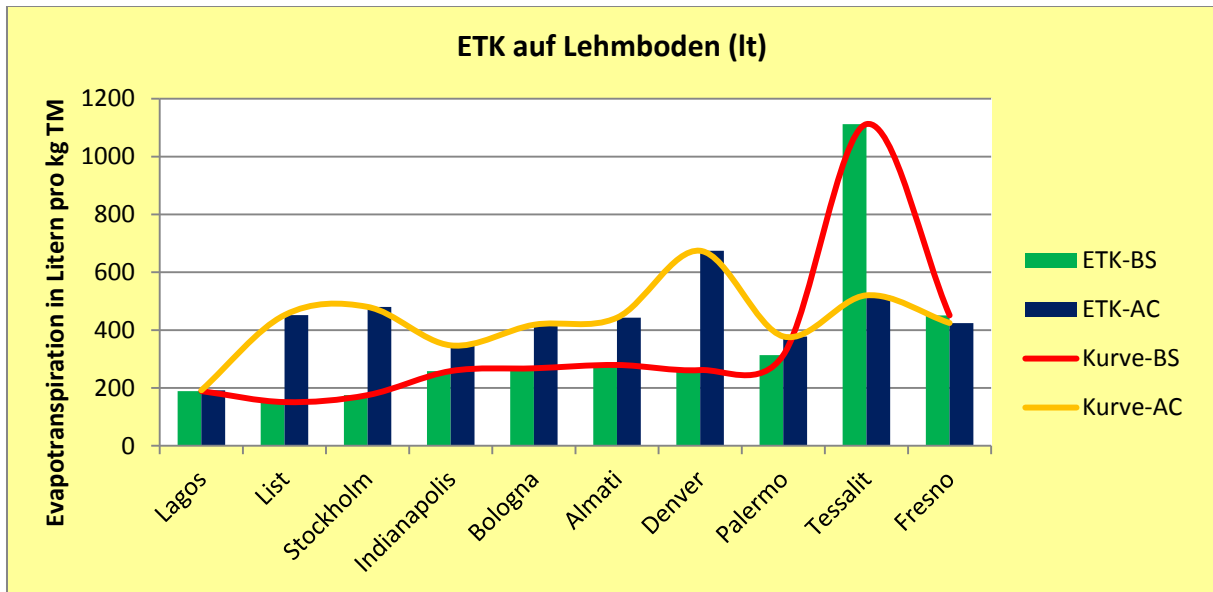


Abb. 5.2.3.2(38): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Lehmboden

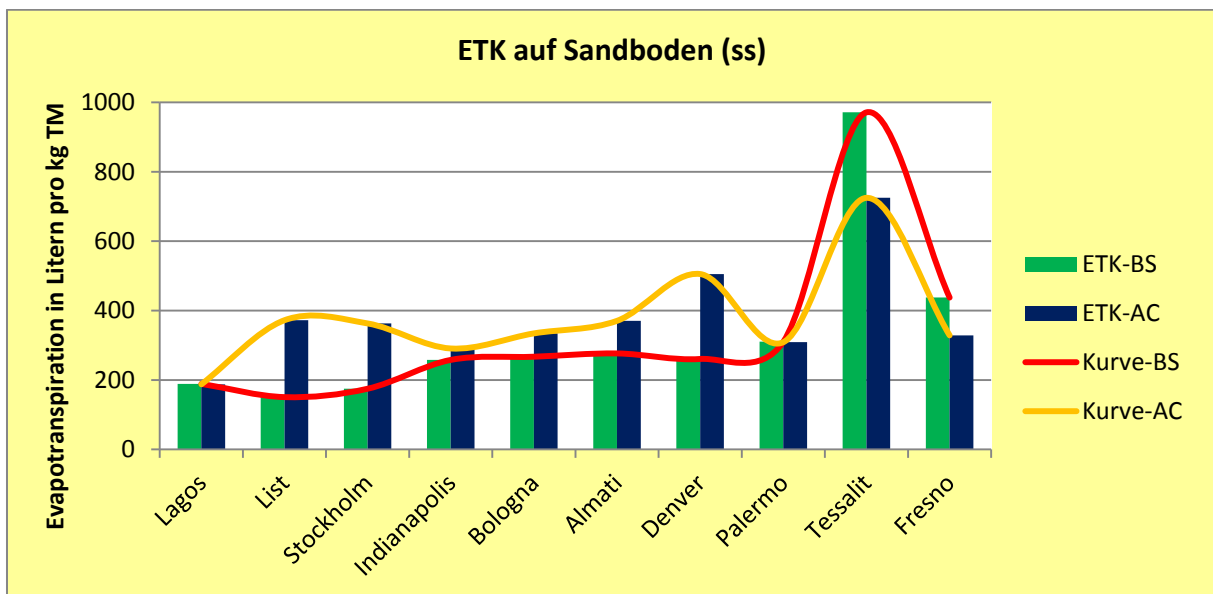


Abb. . 5.2.3.3(39): Evapotranspirationskoeffizienten (ETK) der Modelle auf Sandboden

6. Anwendung des Modells für Ertragsprognosen

6.1 Eingangsdaten und Vorgehensweise

Im folgenden Abschnitt wird nun das Modell BioSTAR verwendet, um für drei niedersächsische Landkreise (Goslar, Wolfenbüttel, Region Hannover) die potenziellen Biomasserträge auf Agrarflächen (Acker) zu berechnen. Die drei Landkreise wurden aufgrund der bestehenden Kooperation zwischen dem Forschungsprojekt „Bioenergie im Spannungsfeld“ (BIS, 2012), in dessen Rahmen das Modell entwickelt wurde, ausgewählt. Auch aus bodenkundlicher Sicht ist in der

Landkreisauswahl eine ausreichende Heterogenität enthalten, um die Ergebnisse in einer überschlägigen Rechnung auf Gesamtniedersachsen umzurechnen.

Die Eingangsdaten für die Ertragsberechnung bestehen aus einem Klimadatensatz aus dem NIBIS® (Niedersächsisches Bodeninformationssystem), das die langjährigen Klimamittelwerte der Klimahauptperiode 1961-1990 plus der Jahre 1991-2000 umfasst (Böhner, 2004). Die Klimawerte sind in die Fläche interpoliert und liegen im Maßstab 1:25.000 in Monatsmitteln vor.

Zu der Modellierung von Ertragspotenzialen mit langjährig gemittelten Klimawerten muss gesagt werden, dass es hierbei zu Ertragsüberschätzungen kommen kann. Dies liegt darin begründet, dass langjährige Klimamittelwerte nivelliert und somit sehr ausgeglichen sind. Nach einer langjährigen Mittelung von Klimawerten weisen alle 12 Kalendermonate Niederschlagshöhen und Temperaturen auf, die für den Pflanzenbau als günstig einzustufen sind. Abhilfe kann hier ein Anpassungsalgorithmus für die Generierung von Extremjahren schaffen. Eine Software (Wetter-Generator) für die Anpassung von Klimamittelwerten wird derzeit am Institut für Geografie der Uni Göttingen entwickelt, diese stand jedoch zum Zeitpunkt der Datenverarbeitung für diese Arbeit noch nicht zur Verfügung. Für zukünftige Modellierungen von langjährigen Klimamittelwerten ergeben sich jedoch mit der für 2013 anvisierten Fertigstellung des Wetter-Generators neue Möglichkeiten der Präzisierung in diesem Bereich.

Die Bodendaten sind der Bük50 (Bodenübersichtskarte 1:50.000) entnommen und stammen ebenfalls aus dem NIBIS®.

Da die Bük50 aus dem NIBIS® in erster Linie einen groben Überblick über die in Niedersachsen vorliegenden Bodenverhältnisse gibt, wurden die Modellergebnisse in einem zweiten Arbeitsschritt auf die Maßstabsebene der Bodenschätzung (1: 5.000) heruntergerechnet. Hierfür wurden die Flächen der Bodenschätzung mit den Bük50-Flächen im GIS (Geografisches Informationssystem) verschnitten.

Die Ergebnistabelle im GIS enthält nach dieser Verschnidung die Bodenschätzungsflächen (in diesem Fall nur Ackerstandorte) mit den entsprechenden, räumlich in Bezug stehenden Erträgen aus dem Modellierungslauf.

Da die für die Bük50 berechnete NFKWE als Hauptgröße für die Verfügbarkeit von Bodenwasser in die Modellberechnung einfließt, wurde diese zunächst auf ihre Übereinstimmung mit den in den Karten der Bodenschätzung enthaltenen Bodenpunkten überprüft. Die Überprüfung dieser beiden Werte ergab, dass in vielen Fällen hohe NFKWE-Werte mit niedrigen oder mittleren Ackerzahlen zusammen lagen oder umgekehrt.

So zeigte eine Korrelationsanalyse der beiden Parameter für die Flächen des Landkreises Goslar einen relativ schwachen Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von lediglich 0,429 (zweiseitig signifikant, Pearson).

Eine weitere Größe, die z.B. im Rahmen der Bodenschätzung mit in die Standortbewertung einfließt, ist die sog. Zustandsstufe aus dem Bodenschätzungsgesetz (BRD, 2008). Die Zustandsstufe erfasst u.a. Parameter wie die Bodenverdichtung, die Tiefgründigkeit und die Durchwurzelbarkeit.

Ein statistischer Vergleich zwischen den beiden Größen "Bodenpunkte" und "Zustandsstufe" zeigte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,691 (zweiseitig signifikant, Pearson) einen deutlich größeren Zusammenhang als bei der NFKWE und der Ackerzahl.

Da die Bodenpunkte als verlässliche Bezugsgröße für die Güte eines Ackerstandortes gelten, ist der Fehler dieser schlechten Werteübereinstimmung bei der gröber aufgelösten, generalisierten Bük50 zu suchen.

Im Bodenschätzungsrahmen für Ackerstandorte gilt für die Zustandsstufe eine Skala von 1 – 7, mit eins als bestem Zustand. Je nach Zustandsstufe werden dann die Bodenpunkte eines Standortes entsprechend nach oben oder unten angepasst. Entsprechend den Anpassungen der Bodenpunkte (Mittelwerte für die jeweilige Bodenart und alle Entstehungsarten) auf Basis der Zustandsstufen wurde dann über lineare Bezugsgleichungen ein Umrechnungsfaktor (Faktor_Z) ermittelt (Gleichung 6.1.1).

Ermittlung des Faktors Z für Bodenart = Lehm

Gleichung 6.1.1

$$\text{Faktor_Z} = (-0,0984 * \text{Zustandsstufe}) + 1,0984$$

Wobei:

Wertebereich der Zustandstufe: 1-7 (dimensioslos)

Maximale Bodenpunkte für Bodenart Lehm: 86 = 100%

Minimale Bodenpunkte für Bodenart Lehm: 38 = 41%

Wertebereich der Funktionsausgabe (Faktor_Z) = 0,41 – 1,0

Wobei der Wert 0,41 dem Anteil der maximal für diese Bodenart möglichen Bodenpunkte entspricht, wenn die schlechteste Zustandsstufe, also Stufe sieben, vorliegt. Liegt hingegen Stufe eins vor, so ist der Ausgabewert der Funktion eins.

Tabelle 6.1.1(14): Faktor_Z, Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der modellierten Erträge für Triticale, Sonnenblume, Silomais und Sorghum sowie selbige für die NFKWE und die Bodenpunkte für die Landkreise Goslar, Hannover und Wolfenbüttel

		Goslar: 22.354 ha		Ertrag in t/ha					
		NFKWE mm	Ackerzahl	Faktor_Z	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum	Mittel
Max		276	94	1,00	20,26	15,91	22,10	16,89	18,79
Min		41	16	0,31	5,53	3,45	4,96	4,37	4,58
Mittel		210	63	0,73	14,40	11,10	15,34	11,92	13,19
		Hannover: 94.822 ha		Ertrag in t/ha					
		NFKWE mm	Ackerzahl	Faktor_Z	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum	Mittel
Max		371	95	1,00	20,30	16,91	22,42	17,24	19,22
Min		41	13	0,31	5,96	4,12	6,01	4,92	5,25
Mittel		146	44	0,73	13,44	9,85	13,84	11,29	12,10
		Wolfenbüttel: 48.612 ha		Ertrag in t/ha					
		NFKWE mm	Ackerzahl	Faktor_Z	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum	Mittel
Max		283	100	1,00	21,48	17,91	22,99	17,87	20,06
Min		41	10	0,25	3,69	2,67	3,35	3,35	3,27
Mittel		204	67	0,79	14,34	10,89	15,05	12,26	13,14

In einem dritten Schritt sind die vom Modell generierten Ertragswerte (Basis hierbei die NFKWE aus der Bük50) mit den bodenartspezifischen Werten des Faktors Z sowie einem Abschlag von -20% angepasst worden. Im Abschlag sind -5% Biomasse für auf dem Feld verbleibende Stoppeln sowie ein mittlerer Abschlag von -15% für die Übertragung der Erträge vom Niveau des Anbauversuchs (gute Eindämmung von Kalamitäten, optimierte Düngung) auf das Niveau des Feldbaus enthalten.

Die somit generierten Erträge für die drei Landkreise und die entsprechenden Bodenbegleitparameter sind gemittelt in Tabelle 6.1.1 dargestellt.

6.2 Darstellungen der Bodenverhältnisse in den drei Landkreisen

Wie sich aus Tabelle 6.1.1 ersehen lässt, unterscheiden sich die Kreise Goslar und Wolfenbüttel hinsichtlich ihrer Bodengüte wenig. Die mittlere NFKWE liegt in Goslar mit 210 mm etwas über der von Wolfenbüttel (204 mm), bei den Bodenpunkten liegt Wolfenbüttel jedoch mit 67 gegenüber 63 in Goslar vorn. Auch hinsichtlich der vom Modell errechneten mittleren Ertragspotenziale unterscheiden sich die beiden Kreise wenig. Wolfenbüttel weist im Vergleich mit Goslar jedoch eine höhere Spannbreite an Bodenqualitäten und Ertragspotenzialen auf. Dies zeigt sich z. B. in der Ausprägung der minimalen und maximalen Bodenpunkte (Goslar 16 – 94), (Wolfenbüttel 10 – 100) sowie in den gemittelten minimalen und maximalen Ertragshöhen (Goslar 4,3 – 18,27 t/ha), (Wolfenbüttel 3,41 – 22,22 t/ha).

Hannover weist mit einer mittleren Bodenpunktezah von 44 und einer mittleren NFKWE von lediglich 146 mm die schlechtesten Bodenverhältnisse der drei Kreise auf. Der auffällig hohe

maximale NFKWE-Wert von 371 mm stammt von einem Hochmoorstandort und ist wenig repräsentativ für die Bodenverhältnisse der Region. Beim Vergleich der Bodenpunkte- und der NFKWE-Karten (Abb. 12.2 und 12.3 im Anhang) lässt sich jedoch gut erkennen, dass die Region Hannover, als größter der drei Kreise, sehr heterogene Bodenverhältnisse besitzt. So befinden sich im Norden vorwiegend leichtere Sande und im Süden schwerere Lehmböden. Auch die NFKWE-Karte von Hannover spiegelt diese Zweiteilung wieder, wenn auch mit deutlich geringerer Differenzierung zwischen den Klassen.

Aus der Bodenpunkte- und der NFKWE-Karte der Landkreise Goslar und Wolfenbüttel (Abb. 12.8 und 12.9 im Anhang) kann man ersehen, dass in beiden Landkreisen, im Vergleich zu Hannover, generell bessere Bodenverhältnisse, d.h. höhere Bodenpunktezahlen und NFKWE-Werte vorherrschen. Die NFKWE-Karte auf der Basis der Bük50 stellt dies, wie in Hannover, im Vergleich zur Bodenkarte der Bodenschätzung mit einer geringeren Differenzierung dar.

6.3 Darstellungen der Ertragspotenziale

Wie aus Tabelle 6.1.1 ersichtlich ist, liegt das mittlere Ertragspotenzial für alle vier modellierten Kulturen in Goslar mit 13,19 t/ha knapp vor Wolfenbüttel (13,14 t/ha) und deutlich vor Hannover (12,10 t/ha) an erster Stelle.

Bei der Einzelbetrachtung der gemittelten Ertragspotenziale liegt Goslar mit 15,34 t/ha für Mais, 14,4 t/ha für Triticale und 11,10 t/ha für Sonnenblume vor Wolfenbüttel (15,05 sowie 14,34 und 10,89 t/ha) und Hannover (13,84 ; 13,44 und 9,85 t/ha). Das höchste Ertragspotenzial für Sorghum liegt mit 12,26 t/ha in Wolfenbüttel, gefolgt von Goslar (11,92 t/ha) und Hannover (11,29 t/ha).

Die potenziellen Ertragshöhen der drei Landkreise entsprechen in ihrer Sortierung also den mittleren NFKWE-Höhen (Goslar: 210 mm, Wolfenbüttel: 204 mm, Hannover 146 mm), wobei die Differenz von etwa 60 mm, die zwischen den Kreisen Goslar und Wolfenbüttel und der Region Hannover existiert, zu einem mittleren Ertragsunterschied von ca. einer Tonne Trockenmasse pro Hektar führt.

Den hier dargestellten gemittelten Ertragswerten liegen die vom Modell generierten Einzelwerte aller Flächen der Bodenschätzungskarte 1:5000 (siehe oben) zugrunde. Die Ertragswerte der Einzelflächen wurden für die Darstellung im GIS zu Klassen aggregiert und sind als Ertragskarten für die einzelnen Kulturen und Landkreise im Anhang (Abb. 12.4 – 12.7 und 12.10 – 12.13) hinterlegt.

6.4 Vergleich der Modellergebnisse mit Erntestatistiken

Als Vergleich und zur Überprüfung der modellierten Ertragshöhen wurden die Triticale- sowie die Silomaiserträge mit Ertragsdaten des Statistischen Landesamtes verglichen (hierfür wurden bei Triticale die Kornerträge über einen Korn/Stroh-Verhältnissfaktor von 1/1 in Trockenbiomasse umgerechnet). Für Sorghum und Sonnenblume waren aufgrund der geringen Verbreitung dieser Kulturen keine langjährigen Datenreihen verfügbar.

Tabelle 6.4.1(15): Vergleich der statistisch erfassten Ertragshöhen für Triticale (1988-2000) und Silomais (1978-2000) und den vom Modell generierten Erträgen sowie die Abweichung derer in Prozent.

		Modell		real 1978/1988-2000		Modellabweichung in %	
Goslar		t/ha					
	Kultur	Triticale	Mais	Triticale	Mais	Triticale	Mais
	Mittel	14,40	15,34	14,34	15,32	0,42	0,18
Hannover		t/ha					
	Kultur	Triticale	Mais	Triticale	Mais	Triticale	Mais
	Mittel	13,44	13,84	12,18	14,10	10,29	-1,85
Wolfenbüttel		t/ha					
	Kultur	Triticale	Mais	Triticale	Mais	Triticale	Mais
	Mittel	14,34	15,05	15,14	14,66	-5,31	2,63
Mittel 3 Landkreise:						1,80	0,32

Für Silomais liegen die gemessenen Erträge auf Landkreisebene und für Gesamtniedersachsen im Zeitraum von 1978 – 2000 und für Triticale von 1988 – 2000 vor (Tabelle 6.4.1). Für Triticale ergeben sich Modellabweichung von 0,42% (Goslar), +10,29% (Hannover) und -5,31% (Wolfenbüttel). Für Silomais sind es 0,18% für Goslar, -1,85% für Hannover und +2,63% für Wolfenbüttel. Im Mittel der drei Landkreise betragen die Abweichungen +1,8% für Triticale und 0,32% für Silomais (vgl. Tabelle 6.4.1).

Um von den für die drei Landkreise ermittelten Ertragspotenzialen auf die niedersächsischen Gesamtpotenziale für Energiepflanzen schließen zu können, wurden die Erntestatistikdaten der drei Kreise mit denen für Gesamtniedersachsen verglichen. Im Vergleich der Ertragshöhen ergibt sich für Silomais ein um -8,04% geringerer Ertrag auf Landesebene, für Triticale sind es -16,44% und gemittelt -12,44%. Aus der Mittleren Abweichung ergibt sich ein Umrechnungsfaktor für die Übertragung auf Niedersachsen von 0,88 (Tabelle 6.4.2).

Tabelle 6.4.2(16): Vergleiche und Abweichungen von langjährigen Silomais- und Triticaleerträgen für die drei Landkreise und Gesamtniedersachsen

Tonnen Trockenmasse nach Erntestatistik						
Zeitraum	Goslar	Wolfenbüttel	Hannover	Mittel 3 Lkr.	Niedersachsen	Abweichung
1978-2000	15,32	14,66	14,10	14,69	13,51	-8,04
1988-2000	14,34	15,14	12,18	13,89	11,55	-16,84
					Mittel:	-12,44
					Faktor Nieders.:	0,88

6.5 Berechnung von Gesamtbiomasse-, Gas- und Primärenergieerträgen

Nach der statistischen Betrachtung der Modellergebnisse aus den drei Landkreisen wurden in einem weiteren Schritt die Gesamtpotenziale aller drei Landkreise für die Trockenbiomasse, den Biogas- und den Methanertrag sowie den Primärenergieertrag berechnet. Für die Berechnung der Trockenmasseerträge wurde ein Energiepflanzenanteil an der Anbaufläche von 30% zugrunde gelegt.

Tabelle 6.5.1(17): Umrechnungstabelle Flächenerträge (t/ha) auf Primärenergieertrag für Goslar

Goslar						
		Faktor Frucht				
		20%	10%	60%	10%	
Kultur	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum		
	Tonnen TM / Jahr				Summe	
Schritt 1.	332.146	257.175	355.106	274.494	1.218.921	
	x 30% x Faktor Frucht				Summe	
Schritt 2.	19.929	7.715	63.919	8.235	99.798	
	1000 m³ Biogas / Jahr				Summe	
Schritt 3.	6.557	2.284	21.605	2.610	33.055	
	TWh Primärenergie / Jahr				Summe	
Schritt 4.	0,057	0,020	0,188	0,023	0,288	

Diese 30% wurden dann auf die vier modellierten Kulturen (Mais, 60%, Triticale, 20%, Sonnenblume, 10%, Sorghum, 10%) aufgeteilt (Tabellen 6.5.1 – 6.5.3).

Tabelle 6.5.2(18): Umrechnungstabelle Flächenerträge (t/ha) auf Primärenergieertrag für Hannover

Hannover						
		Faktor Frucht				
		20%	10%	60%	10%	
Kultur	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum		
	Tonnen TM / Jahr				Summe	
Schritt 1.	1.274.123	933.562	1.312.234	1.070.373	4.590.292	
	x 30% x Faktor Frucht				Summe	
Schritt 2.	76.447	28.007	236.202	32.111	372.768	
	1000 m³ Biogas / Jahr				Summe	
Schritt 3.	25.151	8.290	79.836	10.179	123.457	
	TWh Primärenergie / Jahr				Summe	
Schritt 4.	0,219	0,072	0,696	0,089	1,077	

Tabelle 6.5.3(19): Umrechnungstabelle Flächenerträge (t/ha) auf Primärenergieertrag für Wolfenbüttel

Wolfenbüttel

	Faktor Frucht				Summe
	20%	10%	60%	10%	
Kultur	Triticale	S-Blume	Mais	Sorghum	
	Tonnen TM / Jahr				Summe
Schritt 1.	737.677	562.889	774.069	627.662	2.702.297
	x 30% x Faktor Frucht				Summe
Schritt 2.	44.261	16.887	139.332	18.830	219.310
	1000 m ³ Biogas / Jahr				Summe
Schritt 3.	14.562	4.998	47.094	5.969	72.624
	TWh Primärenergie / Jahr				Summe
Schritt 4.	0,127	0,044	0,411	0,052	0,634

Primärenergiesumme für alle drei Landkreise:	1,999 TWh
--	-----------

Diese Aufteilung wurde willkürlich zu Demonstrationszwecken der Methode vorgenommen und entspricht nicht notwendigerweise dem Anbauspektrum, welches sich auf dem Agrar- und Energiepflanzenmarkt herausbilden würde.

In den Tabellen 6.5.1 – 6.5.3 werden die Trockenbiomasse-, Biogas- und Primärenergiepotenziale für Goslar, Hannover und Wolfenbüttel unter Annahme von 30% Energiepflanzenanbaufläche und entsprechender Fruchtanteile (60%, 20%, 10%, 10%) dargestellt.

Aus den Flächenenerträgen (Schritt 1) lassen sich die Erträge nach Flächenanteilen (Schritt 2), Biogas- und Methanerträge (Schritt 3) sowie die Primärenergieerträge in TWh (Schritt 4) errechnen. Die Umrechnungsfaktoren für Silagegewicht zu Methanertrag, Methanmenge zu kWh und Wirkungsgrad eines BHKW finden sich in Tabelle 6.5.4.

Tabelle 6.5.4(20): Biogas- und Methanerträge (berechnet mit Faustzahlen nach FNR u. LWK) für die vier modellierten Kulturen.

Quellen: (LWK, 2010) und (FNR, 2011)

	BG l/kg*	Methan%	Methan l/kg	Liter / Tonne	kWh/m ³ CH ₄	BHKW**
Mais	650	52	338	0,338	9,97	87,5
Sorghum	610	52	317	0,317	9,97	87,5
Getreide	620	53	329	0,329	9,97	87,5
S-Blume	520	57	296	0,296	9,97	87,5

*BG-Ertrag in Normlitern/kg TM

** Gesamtwirkungsgrad BHKW in %

In Tabelle 6.5.5 sind in einem letzten Schritt die summierten Primärenergieerträge (1,33 TWh p.a.) der drei Landkreise mittels der Ackerflächenanteile (8,8%) und dem Umrechnungsfaktor für das Ertragsniveau Niedersachsens (0,88) auf Gesamtniedersachsen umgerechnet worden. Weiterhin wird berücksichtigt, dass ca. die Hälfte der Energiepflanzenanbaufläche für die Produktion von Biodiesel und Bioethanol benötigt wird (Stand 2011). Im Vergleich zu Potenzialdaten aus der Literatur (Biogasforum, 2007), (Wuppertal Institut, 2006) ergeben sich Abweichungen der modellierten Energieerträge für Biogas aus Nawaro von +1,97 TWh (Biogasforum) und +0,77 TWh (Wuppertal Institut).

Tabelle 6.5.5(21): Berechnung des niedersächsischen Primärenergiepotenzials aus Biogas unter Zuhilfenahme der Biomasse- und Primärenergiepotenziale aus den drei Landkreisen.

	Niedersachsen	Einheit
Ackerland:	1,88	Mio. ha
Energiepflanzen(2010):	0,29	Mio. ha
Anteil in % von Niedersachsen:	15,43	%
3 Landkreise		Einheit
Ackerland:	0,17	Mio. ha
Anteil in % von Niedersachsen:	8,8	Prozent
Strompotenzial 3 Landkreise:	1,99	TWh/Jahr
Faktor 3 Landkreise:	0,88	dimensionslos
Biogas-Strompotenziale Niedersachsen		Einheit
3 Landkr. Umrechnung auf Nds:	19,95	TWh/Jahr
Energiepotenzial (Biogasanteil 50%):	9,97	TWh/Jahr
1. Biogasforum (2007):	8,00	TWh/Jahr
2. Wuppertal Institut (2006):	9,6	TWh/Jahr
Differenz zu 1:	+1,97	TWh/Jahr
Differenz zu 2:	+0,37	TWh/Jahr

7. Landwirtschaft: regional bis international – ein Überblick

7.1 Landwirtschaft in Niedersachsen

Wenn über Biomassepotenziale gesprochen wird, dann ist meistens erst einmal die Biomasse gemeint, die in unserer Agrarlandschaft angebaut werden kann. Die forstlichen Biomassepotenziale haben und werden auch in Zukunft einen wesentlichen Anteil am innerdeutschen Biomassepotenzial haben, aber dieser Anteil lässt sich aufgrund der fast konstanten Waldfläche und dem daraus ableitbaren jährlichen Zuwachs an Holz relativ genau festmachen. Sicherlich ergeben sich auch hier bei einer vermehrten Nutzung von Energieholz Nutzungskonkurrenzen mit der stofflichen Nutzung von Holz (Knoll & Rupp, 2007), aber das Konfliktpotential bei der Biomassegewinnung aus dem Wald dürfte dennoch geringer einzustufen zu sein, als jenes von der Biomassegewinnung in der Agrarlandschaft.

Begründet liegt dies vermutlich darin, dass die Agrarlandschaft die für uns alle lebensnotwendigen Nahrungsmittel zur Verfügung stellen muss, dass die Menschen zusätzlich noch in dieser Landschaft leben (Dörfer befinden sich i.d.R. nicht in Wäldern), und dass die Agrarlandschaft viel intensiver bewirtschaftet wird als die Wälder (Maschineneinsatz, Dünger- und Pestizideinsatz) und somit einem stärkeren Nutzungsdruck unterliegt. Es gilt nach wie vor, dass die moderne, stark intensivierte Landwirtschaft den größten Anteil an Artenverlusten in Deutschland zu verantworten hat. In diesem Kontext sollten Biomassepotenziale und die Bioenergieproduktion in der Agrarlandschaft diskutiert werden, ansonsten können starke Zielkonflikte auftreten – und, wie aus der gegenwärtigen kontroversen Diskussion um Bioenergie zu ersehen ist – sind diese Konflikte ja auch bereits voll entbrannt (vgl. Kapitel 1).

In diesem Gesamtkontext soll an dieser Stelle ein kurzer Einblick in die Struktur der niedersächsischen Landwirtschaft gegeben werden.

7.1.1 Struktur der niedersächsischen Landwirtschaft

Das Land Niedersachsen hat mit 47.634 km² Fläche einen Flächenanteil von 13,3% an der Gesamtfläche der BRD. Von diesen 47.634 km² werden 25.770 km² als Agrarflächen genutzt, dies entspricht einem Anteil von 54% an der Landesfläche und einem Anteil von 15,4 % an der Agrarfläche der Gesamt-BRD. Die durchschnittliche Betriebsgröße liegt in Niedersachsen bei 61,4 ha und 2010 waren 150.700 Menschen in der Landwirtschaft tätig (alle Zahlen aus: ML, 2011).

Niedersachsen gilt als wichtiges Agrarland in Deutschland und kann in der Tat in verschiedenen Erzeugungsbereichen hohe Anteile an der gesamtdeutschen Agrarproduktion aufweisen. Auch im europäischen Vergleich stellt Niedersachsen in einigen Erzeugungsbereichen größere Anteile an der Gesamtproduktion.

Im Bereich der Tierproduktion sowie der Pflanzenproduktion hat Niedersachsen in Deutschland „die Nase vorn“. Lediglich die bayrische Landwirtschaft übertrifft in einigen Produktionsbereichen die der Niedersachsen.

So finden sich z. B. 30,1% aller Schweine, 31,9% aller Legehennen, und 54,1% aller Schlacht- Mast-Hühner bzw. -Hähne in niedersächsischen Ställen. Nur bei der Rinderhaltung und der Milcherzeugung liegt Bayern mit 26,3% und 26,2% an der Spitze.

Im Bereich der Pflanzenproduktion wurden 2010 27,5% aller Zuckerrüben und 45,5% aller Kartoffeln in Niedersachsen angebaut. Lediglich bei der Getreideproduktion (Niedersachsen 5224 Mio. t) leistete Bayern 2010 einen höheren Beitrag (6487 Mio. t) zum Gesamtaufkommen von 37.011 Mio. Tonnen. Im Kontext der EU-27 Agrarproduktion produzierte Niedersachsen im Jahr 2010 nennenswerte Beiträge in den folgenden Bereichen: Schweinefleisch (7,45%), Geflügelfleisch (6,1%), Magermilchpulver (9,81%), Roggen und Wintermengengetreide (7,42%) und Kartoffeln (8,17%).

Wie aus Tabelle 7.1.1 ersichtlich ist, lag der Beitrag der niedersächsischen Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei zur Wirtschaftsleistung des Landes im Jahr 2010 bei 1,5% (2,96 Mrd. €) der gesamten Bruttowertschöpfung. Im Vergleich mit den alten Bundesländern wird Niedersachsen nur von Schleswig-Holstein (Anteil 1,6%) und von Bayern (3,7 Mrd. €) übertroffen, wobei in Schleswig-Holstein die Wertschöpfung deutlich niedriger ist (1,12 Mrd. €) und in Bayern der Anteil der Landwirtschaft an der Bruttowertschöpfung nur bei 0,9% liegt.

In Niedersachsen hat also die Land- und Forstwirtschaft - im Vergleich mit den alten Bundesländern – einen überdurchschnittlich hohen Anteil an der Gesamtwirtschaftsleistung, und die erwirtschafteten Beiträge sind mit fast 3 Mrd. € auch mehr als doppelt so hoch wie der Bundesdurchschnitt von 1,24 Mrd. € (Flächenländer).

Der Produktionswert aller Güter der Ernährungswirtschaft aus Niedersachsen betrug im Jahr 2009 9,0 Mrd. €, wobei hiervon jeweils 3,8 Mrd. € und 5,2 Mrd. € auf pflanzliche und tierische Erzeugnisse (ohne lebende Tiere und Genussmittel) entfielen (Tabelle 7.1.2).

Im Jahr 2009 wurden Güter der Ernährungswirtschaft im Wert von 7,4 Mrd. € aus Niedersachsen ausgeführt, die Einfuhren in dieser Produktgruppe beliefen sich im gleichen Jahr auf 6,2 Mrd. €.

Bei der Betrachtung der beiden Ursprungsgruppen (tierisch, pflanzlich) fällt auf, dass die Anteile an den Ein- und Ausfuhren fast exakt gegensinnig sind und sich 2009 auf 32,2% und 52,2% (Einfuhren) sowie 51,9% und 35,5% (Ausfuhren) beliefen (jeweils ohne lebende Tiere und Genussmittel).

Tabelle 7.1.1(22): Bruttowertschöpfung von Land-u. Forstwirtschaft u. Fischerei in den Flächenländern in Mrd. Euro und als Anteil an der Bruttowertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche.

Quelle: verändert nach (ML, 2011).

Land (nur Flächenländer)	Mrd. Euro	v. H.
Baden-Württemberg	2,17	0,7
Bayern	3,70	0,9
Brandenburg	0,87	1,7
Hessen	1,00	0,5
Mecklenburg-Vorpommern	0,87	2,7
Niedersachsen	2,96	1,5
Nordrhein-Westfalen	2,74	0,6
Rheinland-Pfalz	1,41	1,5
Saarland	0,08	0,3
Sachsen	0,83	1,0
Sachsen-Anhalt	0,86	1,8
Schleswig-Holstein	1,12	1,6
Thüringen	0,56	1,3
Deutschland	19,17	1,24

Tabelle 7.1.2(23): Produktionswerte der Landwirtschaft in Niedersachsen sowie Aus- und Einfuhrwerte von Gütern der Ernährungswirtschaft und die Anteile von tierischen/pflanzlichen Produkten hieran

Posten	Betrag bzw. v.H.
Pflanzliche Erzeugung*	3,776 Mrd. €
Tierische Erzeugung*	5,216 Mrd. €
Ausfuhren Ernährungswirtschaft	7,393 Mrd. €
Einfuhren Ernährungswirtschaft	6,238 Mrd. €
Anteil pflanzlich an Ausfuhren	35,5%**
Anteil tierisch an Ausfuhren	51,9%***
Anteil pflanzlich an Einfuhren	52,2%**
Anteil tierisch an Einfuhren	32,2%***

* Berechnung in jeweiligen Preisen, Stand 2011

**ohne Genussmittel

***ohne lebende Tiere

Quelle: verändert nach (ML, 2011)

7.2 Die deutsche Landwirtschaft

7.2.1 Pflanzenproduktion

In Deutschland wurden 2010 16,7 Mio. ha als Agrarfläche genutzt. Gegenüber 2004/2009 bedeutet dies eine leichte Abnahme um etwa 220.000 ha. Von den 16,7 Mio. ha wurden 2010 11,85 Mio. ha als Ackerland und 4,7 Mio. ha als Grünland genutzt.

Die Hauptanbaufrüchte waren 2010 der Winterweizen mit 3,2 Mio. ha Anbaufläche, direkt gefolgt von Silomais (1,8 Mio. ha), Raps (1,46 Mio. ha). Beim Weizen und beim Raps ist die Anbaufläche von 2004/2009 bis 2010 leicht ausgedehnt worden (+5% und +3,8%), beim Silomais hingegen fand im selben Zeitraum eine starke Ausweitung der Anbaufläche um 28% statt. Andere in nennenswertem Umfang angebaute Kulturen sind Wintergerste (1,3 Mio. ha), Roggen und Wintermengengetreide (0,63 Mio. ha), Körnermais (0,47 Mio. ha), Triticale (0,41 Mio. ha), Ackergräser (0,39 Mio. ha), Zuckerrüben (0,36 Mio. ha) sowie Sommergerste mit 0,35 Mio. ha Anbaufläche (Statistisches Jahrbuch, 2012).

7.2.2 Tierproduktion

Insgesamt wurden 2010 auf 216.000 viehhaltenden Betrieben fast 13 Mio. GV

(1 Großvieheinheit = 500 kg Lebendgewicht) gehalten. Hierbei lag die Geflügelhaltung mit 129 Mio. Tieren bei der Stückzahl an erster Stelle, gefolgt von Schweinen (27,5 Mio.) und Rindern (12,5 Mio.). Von den Rindern waren 4,2 Mio. Milchkühe.

In der Agrarstatistik 2010 sind 144.850 Betriebe als rinderhaltend aufgeführt, und jeweils etwa 60.000 Betriebe hielten Schweine oder Geflügel (Statistisches Jahrbuch, 2011).

7.2.3 Einordnung in den internationalen Kontext

Obwohl Deutschland eine klassische Industrienation ist und nur 0,85% der Bruttowertschöpfung (Statistisches Jahrbuch, 2010) innerhalb des Agrarsektors generiert wird, trägt die deutsche Landwirtschaft in nicht unerheblichem Umfang zur europäischen aber auch zur Weltagrarproduktion bei. So ist Deutschland z. B. nach Frankreich der größte Getreideproduzent in der EU. Im Mittel der letzten 10 Jahre lag die heimische Getreideproduktion bei etwa 45 Mio. Tonnen, wobei die Schwankungsbreite der Jahre erheblich sein kann (2003, 39,4 Mio. und 2004, 51,1 Mio. Tonnen) (Gurrath, 2011).

Auch bei den Zuckerrüben, den Ölpflanzen (25,6 Mio. t), produzierte Deutschland 2010 innerhalb der EU nach Frankreich die zweithöchsten Mengen. Bei der Kartoffelproduktion (11,7 Mio. t) belegte Deutschland 2010 den ersten Rang vor Polen (9,7 Mio. t) und Holland (7,2 Mio. t).

Im europäischen Vergleich führte Deutschland 2010 die Statistik bei der Milchproduktion (29 Mio. Liter), der Butterproduktion (0,4 Mio. t), der Käseproduktion (2 Mio. t) sowie bei der Produktion von Schweinefleisch (5,4 Mio. t) an. Bei der Produktion von Rindfleisch belegte Deutschland 2010 Rang zwei (1,2 Mio. t) hinter Frankreich mit einer Produktion von 1,5 Mio. t (Eurostat, 2010).

7.3 Europäische Landwirtschaft

7.3.1 Pflanzenproduktion

Innerhalb der Europäischen Union (EU-27) ist die Bundesrepublik Deutschland nach Frankreich das wichtigste Agrarland. Frankreich übertrifft die deutsche Produktion von Getreide (70 Mio. t, +40%), Zuckerrüben (35 Mio. t, +35%) und Ölsaaten (7,4 Mio. t, +38%). Lediglich die Kartoffelproduktion lag 2010 in Deutschland mit 12 Mio. t (+68%) über der des Nachbarlandes Frankreich.

Weitere große Agrarproduzenten in der EU sind Polen (Rang 3), Großbritannien (Rang 4), Spanien (Rang 5) sowie Italien (Rang 6). Wäre die Türkei EU-Mitglied, läge sie in der Agrarproduktion noch vor Großbritannien auf Rang 4.

Im Vergleich mit der Welt-Agrarproduktion bezog die EU-27 im Jahr 2010 11,8% der Getreideproduktion, 6% der Zuckerpflanzenproduktion, 8,4% der Knollen- und Wurzelproduktion sowie 18% der Ölpflanzenproduktion auf sich (Tabelle 7.3.1).

Tabelle 7.3.1(24): Wichtige EU-Länder und Türkei bei der Pflanzenproduktion 2010 sowie Vergleich mit Weltproduktion.

Quelle: Eurostat 2010

Land	Millionen Tonnen			
	Getreide	Zuckerrüben	Kartoffeln	Ölsaaten
Deutschland	50	26	12	5,4
Frankreich	70	35	7,1	7,4
Polen	30	11	9,7	2,5
GB	22	8,3	6,4	2
Spanien	18	4,1	2,5	0,9
Italien	16	3,3	1,7	0,8
Türkei	33	16	4,3	1,2
EU-27	296	114	63	29
	Getreide	Zuckerpflanzen	Knollen u. Wurzeln	Ölpflanzen
Welt	2489	1913	753	158
EU % von Weltproduktion	11,8%	6%	8,4%	18%

Tabelle 7.3.2(25): Wichtige Länder bei der Tierproduktion in der EU-27 aus dem Jahr 2010.

Quelle: Eurostat 2010

Land	Millionen Tonnen					
	Milch	Butter	Käse	Rindfleisch	Schweinefleisch	Schafffleisch
Deutschland	29	0,4	2,1	1,2	5,4	<0,1
Frankreich	23,6	0,34	1,9	1,5	2	<0,1
Niederlande	11,6	k.a.	0,8	0,4	1,3	<0,1
Italien	10,5	k.a.	1,2	1,1	1,6	<0,1
GB	13,6	k.a.	0,3	0,9	0,8	0,3
Spanien	5,9	<0,1	0,3	0,6	3,4	0,1
Polen	9	0,12	0,7	0,4	1,7	<0,1
Dänemark	4,8	<0,1	0,3	0,1	1,7	<0,1

7.3.2 Tierproduktion

Im Bereich der Tierproduktion liegt Deutschland innerhalb der EU-27 noch vor Frankreich auf Rang 1. Im Jahr 2010 wurden in der BRD 29 Mio. t Milch, 0,4 Mio. t Butter, 2 Mio. t Käse sowie 5,4 Mio. t Schweinefleisch produziert. Nur bei der Produktion von Rind- und Schafffleisch lag Frankreich 2010 mit jeweils 1,5 und 0,083 Mio. Tonnen vor der BRD.

Weitere wichtige Produzenten von Tierprodukten innerhalb der EU sind die Niederlande, Großbritannien, Polen, Italien, Spanien und Dänemark (Tabelle 7.3.2).

7.4 Landwirtschaft – global

Die globale Landfläche beträgt 13 Mrd. ha. Hiervon wurden 2010 etwa 10% (1,38 Mrd. ha.) als Ackerflächen genutzt, weitere 0,146 Mrd. ha (1,12%) waren 2010 mit Dauerkulturen bepflanzt. Den größten Anteil innerhalb der agrarischen Nutzung belegten die Weideflächen mit 3,35 Mrd. ha bzw. einem Anteil an der Gesamtfläche von 25,8%. Alle Zahlen des Abschnittes 7.4 stammen aus FAO-Statistik 2010 (FAO, 2010) und dem Statistical Yearbook 2011 (UN, 2011) und finden sich teilweise tabelliert in Tabellen 7.4.1 – 7.4.5.

Die sechs flächenmäßig größten Länder der Erde waren im Jahr 2008 Russland (1,64 Mrd. ha), China (0,93 Mrd. ha) die USA (0,91 Mrd. ha), Kanada (0,91 Mrd. ha), Brasilien (0,85 Mrd. ha) sowie Australien mit 0,77 Mrd. ha. Schon deutlich kleiner folgt auf Rang sieben dann Indien mit knapp unter 0,3 Mrd. ha Landfläche.

Die größten Ackerflächen befanden sich 2008 in den USA (0,17 Mrd. ha), Indien (0,16 Mrd. ha) sowie in Russland (0,12 Mrd. ha) und China (0,11 Mrd. ha). Bei der Betrachtung dieser Zahlen fällt auf, dass Indien mit 53% einen deutlich höheren Ackerlandanteil besitzt als z.B. die USA (19%), China (12%) oder Russland (7%).

Das mit 35 Mio. ha vergleichsweise kleine Deutschland hat mit seinen knapp 12 Mio. ha Ackerflächen einen vergleichsweise hohen Ackerlandanteil (34%).

Die drei Länder mit den größten Anbauflächen für Dauerkulturen waren 2008 Indonesien (15 Mio. ha), China (13,9 Mio. ha) und Indien mit 11 Mio. ha.

Die größten Weideflächen und –Anteile an der Gesamtfläche befanden sich 2008 in China (400 Mio. ha, 43%), Australien (373 Mio. ha, 48%) und den USA (238 Mio. ha, 26%). In Deutschland lag der Weideflächenanteil an der Gesamtfläche im Jahr 2008 bei 13,7% (4,8 Mio. ha).

7.4.1 Erntemengen und Flächeninanspruchnahme wichtiger Agrarerzeugnisse

7.4.1.1 Weltproduktion Getreide

Weltweit wurde 2009 auf 708 Mio. ha Getreide angebaut und eine Gesamtproduktion von etwa 2,5 Mrd. Tonnen erzielt. Dies entspricht einem Durchschnittsertrag von 3,5 t/ha. Im Vergleich zum Zeitraum 1999-2001 wurde die Anbaufläche um 5,3% ausgeweitet und der Gesamtertrag konnte um 19% gesteigert werden (1,5% p.a.). Die größten Getreideanbauländer waren 2009 China (484 Mio. t), USA (420 Mio. t) sowie Indien mit 247 Mio. Tonnen. Deutschland lag 2009 mit knapp 50 Mio. Tonnen Getreide auf Rang acht, hinter Frankreich (70 Mio. t), Brasilien (71 Mio. t), Indonesien (82 Mio. t) und Russland mit 95 Mio. Tonnen (Tabelle 7.4.2).

7.4.1.2 Weltproduktion Zuckerpflanzen

2009 betrug die Fläche, auf der Zuckerpflanzen angebaut wurden, 28 Mio. ha, die Gesamterntemenge lag bei 1,9 Mrd. Tonnen und der Durchschnittsertrag somit bei 68 t/ha. Die drei größten Anbauländer für Zuckerpflanzen waren 2009 Brasilien (690 Mio. t), Indien (285 Mio. t) und

China mit 123 Mio. Tonnen. Deutschland belegte 2009 Rang 13 mit 26 Mio. geernteten Tonnen. Die Ausweitung der globalen Anbaufläche lag im Zeitraum 1999-2001 bis 2009 bei 8%, die Ertragssteigerung sogar bei 26%. Die Ertragserwartung für Zuckerpflanzen ist im selben Zeitraum also um 2% p.a. gestiegen (Tabelle 7.4.3).

7.4.1.3 Weltproduktion Ölpflanzen

Weltweit wurden 2009 auf 261 Mio. ha Ölpflanzen angebaut und es wurde ein Gesamtertrag von 157 Mio. Tonnen erzielt. Im Zeitraum von 1999-2001 bis 2009 wurden Anbaufläche und Produktion um 18 bzw. 42% ausgeweitet. Dies entspricht einem Jährlichen Ertragszuwachs von etwa 2,7%.

Die Hauptanbauländer für Ölpflanzen waren 2009 Indonesien (22 Mio. t), Malaysia (20 Mio. t), die USA (18,5 Mio. t) sowie China mit 16 Mio. Tonnen. In Deutschland wurden 2009 2,4 Mio. Tonnen Ölpflanzen geerntet (Rang 13). Auffällig sind hierbei die beiden Länder Indonesien und Malaysia (Ölpalmen) sowie die USA und China (Soja) (Tabelle 7.4.2).

7.4.1.4 Weltproduktion Hülsenfrüchte

Die Weltproduktion von Hülsenfrüchten lag im Jahr 2009 bei 61 Mio. Tonnen, die Gesamtanbaufläche bei 70,5 Mio. ha.

Im Zeitraum 1999-2001 bis 2009 wurden Anbaufläche und Produktion um 6 bzw. 9% ausgeweitet und eine jährliche Ertragssteigerung von bescheidenen 0,33% erzielt.

Die Hauptanbauländer waren 2009 Indien (13,7 Mio. t), Kanada (5,2 Mio. t), China (4,2 Mio. t) und Myanmar und Brasilien gleichauf mit jeweils 3,5 Mio. Tonnen. Auffällig ist hierbei die weit vorne liegende Produktion in Indien (22% der Weltproduktion) sowie die hohe Produktion in Myanmar, welches mit lediglich 0,76% der Weltagrarfläche fast 5,8% der Weltproduktion von Hülsenfrüchten auf sich bezieht. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte in der religionsbedingten, (Hinduismus, Buddhismus) und in diesen Ländern stark verbreiteten vegetarischen Ernährungsweise liegen (Hülsenfrüchte als Eiweißträger) (Tabelle 7.4.2).

7.4.1.5 Weltproduktion Wurzeln und Knollen

2009 wurden global auf etwa 54 Mio. ha Ackerfläche ein Ertrag von 753 Mio. Tonnen an Wurzel- und Knollenfrüchten erzielt. Dies entspricht einem Hektarertrag von 14 Tonnen pro Hektar.

Im Zeitraum 1999-2001 bis 2009 wurden Anbaufläche und Produktion um 1,7 bzw. 9% ausgeweitet, der Ertragszuwachs betrug somit 0,8% pro Jahr.

Die Hauptanbauländer für Wurzel- und Knollenfrüchte waren 2009 China (156 Mio. t), Nigeria (89 Mio. t) sowie Indien (45 Mio. t). Deutschland lag 2009 mit einer Ernte von 11,6 Mio. Tonnen auf Rang 13 der Anbaustatistik noch hinter Angola, Kongo und Ghana. Auffällig ist bei dieser Statistik die hohe Produktion dieser Anbaufrüchte in den zuletzt genannten drei afrikanischen Ländern. Diese drei Länder belegen in keiner der vorangegangenen Statistiken einen der ersten 20 Ränge (Tabelle 7.4.3).

7.4.1.6 Welttierhaltung und -Tierproduktion

2008/2009 wurden weltweit etwa 18,5 Mrd. Hühner, fast 2 Mrd. Schafe und Ziegen, 1,5 Mrd. Rinder und Büffel, 941 Mio. Schweine, 59 Mio. Pferde, 55 Mio. Esel sowie 25 Mio. Kamele gehalten - also zusammen genommen mehr als 23 Mrd. Nutztiere (UN, 2011) (FAO, 2010).

Die Statistik der Tierhaltung für 2009 wird von vier Ländern, China, Indien, Brasilien und den USA angeführt. In China wurden 2009 281 Mio. Schafe und Ziegen, 116 Mio. Rinder und Büffel, 451 Mio. Schweine und 4,6 Mrd. Hühner gehalten. Brasilien taucht 2009 bei der Schafhaltung nicht unter den ersten zehn Ländern der Statistik auf, liegt aber bei der Rinder/Büffel- und Schweinehaltung mit jeweils 206 Mio. und 37 Mio. jeweils unter den ersten drei Ländern. Die USA lagen 2009 bei der Rinderhaltung mit 95 Mio. Tieren auf Rang vier und bei der Schweine- und Hühnerhaltung mit jeweils 67 Mio. und 2 Mrd. Tieren auf den Rängen zwei.

In Indien wurden 2009 nach China mit 192 Mio. Tieren die meisten Schafe und Ziegen gehalten. In Anbetracht der Tatsache, dass sowohl in Indien als auch in China noch große Teile der Bevölkerung in ländlichen und ärmeren Verhältnissen leben, bestätigen diese Zahlen vermutlich die Behauptung, "dass die Ziege die Kuh des armen Mannes ist". Weiterhin tauchen die Länder Indonesien (1,25 Mrd. Hühner) und Vietnam (27,6 Mio. Schweine) auf den ersten vier Rängen auf. Auf Rang fünf folgt, direkt hinter Vietnam, Deutschland mit 26,8 Mio. Schweinen (Tabellen 7.4.4 und 7.4.5).

7.4.1.7 Weltagrarhandel

Wie die meisten Waren, Produkte und Rohstoffe, die heutzutage in der globalisierten Welt produziert, transportiert, verarbeitet und konsumiert werden, unterliegen auch Agrargüter einem internationalen Handel.

Global lag der Warenwert aller Agrarimporte im Jahr 2008 bei 1,1 Mrd. \$, der Wert der Exporte war fast ebenso hoch. Gegenüber dem Zeitraum 1999-2001 hat bei den Agrargütern sowohl bei den Importen als auch bei den Exporten eine Steigerung um über 250% stattgefunden.

Die Länder, die 2008 am stärksten an diesen Warenströmen beteiligt waren, waren Deutschland (Importe: 83 Mio. \$, Exporte: 71 Mio. \$), die USA (Importe: 82 Mio. \$, Exporte: 118 Mio. \$), China (Importe: 81 Mio. \$, Exporte: 36 Mio. \$), Großbritannien (Importe: 58 Mio. \$, Exporte: 25 Mio. \$), Japan (Importe: 57 Mio. \$, Exporte: 2,7 Mio. \$), Frankreich (Importe: 53 Mio. \$, Exporte: 68 Mio. \$), Italien (Importe: 45 Mio. \$, Exporte 37 Mio. \$), Niederlande (Importe: 50 Mio. \$, Exporte 79 Mio. \$), Kanada (Importe: 26 Mio. \$, Exporte: 37 Mio. \$) (Tabelle 7.4.1).

7.4.1.8 Weltagrarpopulation

Im Gegensatz zu hoch entwickelten Ländern wie beispielsweise Deutschland verdienen in den ärmeren Ländern erheblich mehr Menschen ihren Lebensunterhalt direkt mit der Landwirtschaft oder leben direkt von ihren eigenen Agrarerzeugnissen (Subsistenzwirtschaft). Als Extrembeispiel

kann hier z. B. Äthiopien angeführt werden. In Äthiopien lebten 2010 knapp 85 Mio. Menschen, von denen etwa 66 Mio., also 76% zur Agrarbevölkerung gerechnet wurden.

Doch auch in Schwellenländern wie Indien oder China ist der Anteil der Agrarbevölkerung nach wie vor relativ hoch. In Indien lag dieser im Jahr 2010 bei 48% und in China sogar bei fast 61%. In beiden Ländern hat sich im Zeitraum von 1999-2001 bis 2010 der Agrarbevölkerungsanteil um fast 10% verringert, ein Indikator für das rasante wirtschaftliche Wachstum in diesen beiden Ländern.

Global lag der Agrarbevölkerungsanteil 2010 bei 38% und verringerte sich somit gegenüber 1999-2001 ebenfalls um 10%.

Auch in Deutschland, einem Land, in dem heute nur noch ein kleiner Prozentsatz der Bevölkerung in der Landwirtschaft tätig ist, ließ sich im selben Zeitraum noch eine kräftige Abnahmetendenz bei der in der Landwirtschaft tätigen Bevölkerung ausmachen. Waren hierzulande im Zeitraum 1999-2001 noch 2,5% der Gesamtbevölkerung in der Landwirtschaft tätig, so waren es 2010 nur noch 1,6%. Also absolut eine geringe Abnahme, prozentual gesehen jedoch nicht unerheblich (-37%).

7.4.1.9 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann über die Weltagrarproduktion gesagt werden, dass es einige wenige Länder gibt (USA, China, Indien, Brasilien, Russland), in denen sowohl hohe Mengen im Bereich der Pflanzenproduktion als auch in der Tierproduktion erzielt werden. Diese Länder besitzen sowohl große verfügbare Flächen an Agrarland und sind zudem klimatisch begünstigt. Aber auch ein kleines Land wie die Bundesrepublik Deutschland schafft es, aufgrund von klimatischer Begünstigung und dem Vorhandensein von moderner Agrartechnik in einigen Sparten (siehe oben) nennenswerte Beiträge zur Weltagrarproduktion beizusteuern.

Tabelle 7.4.1 (26): Wichtige Agrarproduzenten (Staaten) und sowie deren Agrar-Ex- und Importe

		In Mio. ha (gerundet)			In Mrd. US\$ (gerundet)		
Land	Acker %	Fläche	Acker	Weide	Land	Agrarimporte	Agrarexporte
Russland	7	1638	122	92	USA	82	118
China	12	934	109	400	BRD	83	71
USA	19	915	171	238	China	81	36
Kanada	5	909	45		GB	58	25
Brasilien	7	846	61	196	Frankreich	53	68
Australien	6	768	44	373	Italien	45	37
Indien	53	297	158	10	Niederlande	50	79
BRD	34	35	12	4	Kanada	26	37

Tabelle 7.4.2 (27): Wichtige Produzenten von Getreide und Hülsenfrüchten

Angaben in Millionen Tonnen und gerundet					
Land	Getreide	Land	Ölpflanzen	Land	Hülsenfrüchte
China	484	Indonesien	22	Indien	13,7
USA	420	Malaysia	20	Canada	5,2
Indien	247	USA	18,5	China	4,2
Russland	95	China	16	Myanmar	3,6
Indonesien	82	Brasilien	11	Brasilien	3,6
Brasilien	71	Indien	10	Nigeria	3
Frankreich	70	Argentinien	7	USA	2,3
Deutschland	50	Deutschland	2,4	Äthiopien	2

Tabelle 7.4.3 (28): Wichtige Produzenten von Zuckerpflanzen sowie von Wurzeln u. Knollen

Angaben in Millionen Tonnen und gerundet			
Land	Zuckerpflanzen	Land	Wurzeln- u. Knollen
Brasilien	690	China	156
Indien	285	Nigeria	89
China	123	Indien	45
Thailand	67	Russland	31
USA	54	Ghana	19,6
Mexiko	51	Kongo	15,6
Pakistan	50	Angola	14,6
Deutschland	26	Deutschland	11,6

Tabelle 7.4.4 (29): Stückzahlen von Hühnern sowie von Rindern und Büffeln

Angaben in Millionen Tieren und gerundet					
Land	Hühner	Land	Rinder u. Büffel	Land	Schweine
China	4600	Indien	280	China	451
USA	2060	Brasilien	205	USA	67
Indonesien	1250	China	116	Brasilien	37
Brasilien	1200	USA	95	Vietnam	28
Indien	584	Pakistan	63	Deutschland	27
Deutschland	115	Deutschland	13	Spanien	26

Tabelle 7.4.5 (30): Stückzahlen von Schafen und Ziegen sowie von Eseln und Maultieren

Angaben in Millionen Tieren und gerundet					
Land	Schafe u. Ziegen	Land	Esel u. Maultiere	Land	Pferde
China	281	China	10	USA	9,5
Indien	192	Mexiko	6,5	China	6,8
Sudan	95	Pakistan	4,6	Mexiko	6,4
Pakistan	86	Brasilien	2,5	Brasilien	5,7
Australien	73	Iran	1,8	Argentinien	3,7
Äthiopien	48	Niger	1,6	Mongolei	2,2
Deutschland	2,6	Deutschland	k.a.	Deutschland	0,6

7.4.5 Ökologische Landwirtschaft – Ein globaler Überblick

Als Vorabinformation für Kapitel 9 wird in diesem Abschnitt kurz auf eine globale Statistik (Willer & Yussefi, 2001) zum Ausbaustand der ökologischen Agrarkultur eingegangen.

Weltweit befinden sich derzeit fast 16 Mio. ha unter Bewirtschaftung nach den Richtlinien der ökologischen Landwirtschaft. Gemessen als Anteil an der globalen Ackerfläche von 1,38 Mrd. ha (s.o.) sind dies etwa 1,2 %.

Nach Kontinenten aufgeschlüsselt sind die Flächen unter ökologischer Bewirtschaftung sehr unterschiedlich verteilt. So fällt Ozeanien mit fast 50% aller globalen Ökolandbauflächen sehr stark ins Gewicht (Maßgeblich geprägt durch Australien). Europa stellt derzeit ca. 24% aller Ökolandbauflächen, Lateinamerika 20%, Nordamerika knapp 7,5%, Asien und Afrika jeweils weniger als ein Prozent.

Schaut man sich die Dimension des Ökolandbaus in einzelnen Ländern sowie den jeweiligen Ökolandbauanteil an der Gesamtagrarfläche dieser Länder an, so sieht man, dass sich etwa 15 Staaten mit Anbauflächen von 100.000 ha oder größer deutlich vom Rest der Agrarproduzenten abheben (Tabelle 7.4.5.1).

Bei den großen Ökoproduzenten handelt es sich, mit Ausnahme von Argentinien und Brasilien, ausnahmslos um Länder der alt-industrialisierten Welt. Die größten Ökolandbauflächen befinden sich in Australien (7,7 Mio. ha), Argentinien (3 Mio. ha), Italien (0,96 Mio. ha) sowie den USA (0,9 Mio. ha).

Tabelle 7.4.5.1(31): Rangskalierung ausgewählter Länder hinsichtlich Gesamtanbaufläche und prozentualer Anbaufläche (an der Gesamtagrarfläche) des ökologischen Landbaus

Quelle: Willer et al., 2001

Rang	Land	Fläche Ökolandbau in ha	Rang	Land	%-Anteil Ökolandbau
1	Australien	7.654.924	1	Lichtenstein	17,97
2	Argentinien	3.000.000	2	Österreich	8,43
3	Italien	958.687	3	Schweiz	7,87
4	USA	900.000	4	Finnland	6,79
5	Deutschland	452.279	5	Italien	6,46
6	GB	380.000	6	Schweden	5,60
7	Spanien	352.165	7	Dänemark	5,46
8	Frankreich	316.000	8	Tschechien	3,15
9	Österreich	287.900	9	Deutschland	2,64
10	Kanada	188.195	10	Slowakei	2,45
11	Schweden	174.000	11	GB	2,4
12	Finnland	147.423	12	Norwegen	1,84
13	Dänemark	146.685	13	Argentinien	1,77
14	Tschechien	110.756	14	Australien	1,62
15	Brasilien	100.000	15	Niederlande	1,39
16	Mexiko	85.676	... 32	Kanada	0,25
17	Schweiz	84.271	... 33	USA	0,22

Schon mit deutlich kleineren Hektargrößen (>0,2 bis <0,5 Mio. ha) folgen auf den Rängen 5-9 die Länder Deutschland, Großbritannien, Spanien, Frankreich und Österreich.

Schaut man sich allerdings die prozentualen Anteile der Ökolandbauflächen an den jeweiligen Gesamtagrarflächen der Länder an, ergibt sich eine geänderte Sortierung.

An der Spitze liegen nun kleinere Länder Europas (Lichtenstein 18%, Österreich 8,4%, Schweiz 7,9%), gefolgt von Finnland (6,8%), Italien (6,5%), Schweden (5,6%), Dänemark (5,5%), Tschechien (3,2%), Deutschland (2,6%), der Slowakei (2,5%) und Großbritannien mit 2,4% Anteil an der Gesamtagrarfläche. Die USA, die mit 900.000 ha Ökolandbaufläche in der ersten Statistik noch auf Platz 4 zwischen Italien und der BRD rangiert, liegt in der Tabelle 4.4.5.1 mit nur 0,22% Anteil an der Gesamtagrarfläche deutlich weiter hinten.

8. Biomassepotenziale und Bioenergienutzung

8.1 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung in Niedersachsen

In ganz Deutschland, und insbesondere in Niedersachsen, lässt sich seit einigen Jahren ein rasanter Zuwachs im Bereich der Biogaserzeugung und – Nutzung feststellen.

Ausgehend vom Jahr 2001 bis zur letzten Schätzung für das Jahr 2011 ist die Zahl der Biogasanlagen (BGA) von unter 200 auf etwa 1.300 angestiegen. Im Mittel wurden pro Jahr etwa 100 Anlagen zugebaut und die installierte elektrische Leistung von unter 50 MW (2001) auf über 600 MW erhöht (Schätzwert für 2011) (ML, 2011).

Die räumliche Verteilung der Biogasanlagen (BGA) und der installierten Leistung stellt sich in Niedersachsen sehr heterogen dar.

Eine starke Konzentration von Biogasanlagen befindet sich in den Veredelungsregionen, in den Landkreisen Cloppenburg, Oldenburg, Emsland, Diepholz, Vechta, Grafschaft Bentheim und Nienburg.

Bei der prozentualen Verteilung der BGA fällt auf, dass sich über 60% aller Anlagen in der Veredelungsregion (39%) und im Gebiet der Milchvieh- und Rindermast (25%) befinden.

Nur 36% der Anlagen befinden sich in den Gebieten des Ackerbaus der leichten bis mittleren Standorte (24%) und den Ackerbauregionen Südniedersachsens (12%). Ähnlich stellt sich die prozentuale Verteilung der installierten elektrischen Leistung dar. Spitzenreiter bei der installierten elektrischen Leistung sind die Kreise Cloppenburg (40-60 MW), Rotenburg und Heidekreis (jeweils 30-40 MW) (ML, 2010).

Hohe BGA-Konzentrationen weisen auch die Landkreise Heidekreis (ehemals Soltau-Fallingb., Celle und Rothenburg auf (ML, 2011) & (ML, 2010).

Das Cluster im Raum um den Landkreis Cloppenburg weist insgesamt eine hohe Viehbesatzdichte mit 2 bis >3 GV (Großvieheinheiten) je ha LF (Landfläche) auf. Auffallend sind hierbei die hohen Konzentrationen an Legehennen (bis > 1500 je ha LF), Masthühnern (bis > 5000 je ha LF) und Truthühnern (bis > 1000 je ha LF) sowie an Schweinen.

Allein in den vier Landkreisen Emsland, Cloppenburg, Vechta und Osnabrück wurden im Jahr 2007 53% aller niedersächsischen Schweine (8,2 Mio.) gehalten (LSKN, 2012). Im Jahr 2011 lag die Anzahl der gehaltenen Schweine mit 8,1 Mio. knapp unter dem Wert von 2007.

Bei der Milchviehhaltung weist von den oben genannten Kreisen einzig die Grafschaft Bentheim eine erhöhte Dichte von 50 bis 70 Milchkühen je ha LF auf (ML, 2011).

Als Substrate wurden 2011 in niedersächsischen BGAs 12,3 Mio. t Energiepflanzen, etwa 14 Mio. t an landwirtschaftlichen Reststoffen und Nebenprodukten (u.a. Gülle und Mist) sowie 1,45 Mio. t Bioabfälle (Fette u. ä.) verwendet.

2011 wurde für den Anbau der Energiepflanzen eine Fläche von 290.000 ha in Anspruch genommen, die Produktion der Ausgangsprodukte der Bioabfälle beanspruchte 2011 eine Fläche von 40.000 ha (ML, 2011).

Im Mittel wurde 2010 etwa 9% der niedersächsischen Ackerfläche für die Energiepflanzenproduktion verwendet, im Jahr 2011 lag dieser Anteil schon bei über 12%.

Nach Landkreisen differenziert zeigt sich hierbei jedoch ein sehr heterogenes Bild.

In den Landkreisen Heidekreis (28%), Oldenburg und Celle (jeweils 24%), Friesland und Rotenburg (jeweils 19%), Cloppenburg (17%) und Aurich (16%) lag der Anteil z. B. deutlich über dem Mittel des Jahres 2010 (Faktor 2-3) (ML, 2011).

Der Anteil der Energiemaisanbaufläche an der Gesamtanbaufläche lag im Jahr 2011 bei 11% (205.000 ha), der Gesamtanteil der Maisanbaufläche (Futter + Energie) bei 32% (593.441 ha). Allein im Zeitraum von 2005 bis 2011 ist der Energiemaisanteil um etwa Faktor acht angestiegen (ML, 2011). Aus der Differenz der Energiemaisanbaufläche und der Gesamtanbaufläche für BGA-Energiepflanzen (290.000 minus 205.000 ha) ergibt sich eine Fläche von 85.000 ha (29%) auf denen Energiepflanzen, andere als Mais, für BGAs angebaut werden.

8.1.1 Biomassepotenziale Niedersachsen

Niedersachsen verfügt derzeit über etwa 2,6 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche. Hiervon werden zurzeit etwa 72%, also 1,88 Mio. ha als Ackerland genutzt. Noch einmal 0,7 Mio. ha (26%) entfallen auf die Nutzung als Dauergrünland.

In der Summendifferenz sind enthalten: Nutz- und Hausgärten, Obstanlagen, Baumschulen sowie Weihnachtsbäume und andere Dauerkulturen.

In den letzten Jahren sind die Gesamtfläche sowie die Teilflächennutzungen relativ konstant geblieben

Im Jahr 2011 wurden in Niedersachsen auf insgesamt 311.000 ha Energiepflanzen und auf weiteren 20.000 ha Pflanzen für die stoffliche Nutzung angebaut.

Insgesamt wurden 2011 also knapp 13% der Agrarfläche für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen verwendet.

Seit 2005 ist bei der Energiepflanzenanbaufläche eine Ausweitung um Faktor 4 zu beobachten, die Anbaufläche für andere NawaRos (Nachwachsende Rohstoffe) ist im selben Zeitraum von 33.000 auf 20.000 ha, also um 40% gesunken (ML, 2012)

Bei der Inanspruchnahme der Ackerflächen macht der Anbau von Energiepflanzen für die Verwendung in den etwa 1.300 BGA mit 79% den größten Anteil aus. Die verbleibenden 21% entfallen auf die Raps-Biodieselproduktion (15,5%) sowie die Bioethanolproduktion (5,2%) und den Anbau von Festbrennstoffen (0,3%) wie KUP (Kurzumtriebsplantagen) und Miscanthus (ML, 2011). Auch für die Zukunft ist durch die Gesetzgebung hinsichtlich des Ausbaus der erneuerbaren Energien mit einem steigenden Flächenbedarf für die Produktion von Energiepflanzen auf den niedersächsischen Agrarflächen zu rechnen.

So ist z. B. in der Koalitionsvereinbarung vom September 2010 als Zielmarke gesetzt worden, bis 2030 50% und bis 2050 80% des Bruttostromverbrauchs durch Stromerzeugung aus regenerativen Quellen

abzudecken. Der Beitrag der Erneuerbaren zum Bruttoendenergieverbrauch soll bis zum Jahr 2030 35% und bis zum Jahr 2050 auf 60% steigen (BMW-BMU, 2010).

Ausgehend von einem prognostizierten Endenergieverbrauch von 7.000 PJ im Jahr 2030 (EWI, 2010) liegt dieser Beitrag dann bei 2.450 PJ.

Große Hoffnungen werden hierbei u. a. auf den Zubau im Bereich der Energiegewinnung aus Biomasse gesetzt. Der gemeinsame europäische Biomasseaktionsplan sieht beispielsweise vor, die energetische Biomassenutzung in den nächsten Jahren zu verdoppeln.

Auch für Deutschland wird für den Bereich der Bioenergienutzung im Zeitraum 2012 bis 2020 in etwa eine Verdoppelung prognostiziert und die installierte elektrische Leistung soll dann bei etwa 6,2 GW (54 TWh oder 190 PJ p.a.) liegen. Die größten Zuwächse (+ 260%) bei den erneuerbaren Energien werden allerdings bei der Windenergie erwartet (FNR, 2011).

Ausgehend von einer Projektion für das Jahr 2050, bei dem der Energiepflanzenanteil des Bioenergiepotenzials bei ca. 45% liegen soll, würde das für das Jahr 2020 eine installierte elektrische Leistung von 2,8 GW (24 TWh oder 85,5 PJ p.a.) bedeuten.

Bei einem mittleren Flächenbedarf von 0,36 bis 0,4 ha pro kW (ML, 2010) würde hierfür bundesweit eine Fläche von etwa 1 – 1,1 Mio. ha (8,3 – 9,1 % der Ackerfläche) benötigt werden (2010 waren es etwa 800.000 ha).

Niedersachsen, schon heute das Land mit der höchsten installierten Anlagenleistung (ML, 2010) und einer hohen Agrarproduktion (ML, 2011), wird wahrscheinlich einen Anteil größer als diese 8,3% (die ja bereits 2010 durch Biogas-Energiepflanzenanbau beansprucht wurden) hierzu beisteuern. Wenn von einer Verdoppelung ausgegangen wird (siehe oben), würde im Jahr 2020 etwa 16% der niedersächsischen Ackerfläche für Biogas-Energiepflanzen in Anspruch genommen werden.

Langfristig aus Biogas bereitstellbare Potenziale werden für Niedersachsen mit 19,5 Mio. MWh p.a. (2226 MW) beziffert (Biogasforum, 2007), von denen bis heute etwa 30% (700 MW) genutzt werden. Dieses Potenzial setzt sich zusammen aus 8 Mio. MWh gewonnen aus Energiepflanzen, 8 Mio. MWh gewonnen aus Wirtschaftsdünger, 3 Mio. MWh gewonnen aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten und 0,5 Mio. MWh gewonnen aus organischen Reststoffen

Eine Studie des Wuppertal Institutes (Wuppertal Institut, 2006) siedelt die Nawaro-Potenziale (Biogas) für Deutschland bei etwa 60 TWh an. Gemessen an den Ackerflächen (BRD = 11,9 Mio. ha, Niedersachsen = 1,88 Mio. ha) ergibt sich für Niedersachsen ein Biogaspotenzial aus Nawaro von 9,6 TWh (Faktor 0,16).

Ausgedrückt als Flächenbedarf für den Energiepflanzenanteil würde eine Biogasproduktion von 10 TWh (el.), je nach Flächenertrag und Anbauintensität, zwischen 274.000 ha (14,6% der AF bei 0,24 ha/kW) und 319.000 ha (17% der AF bei 0,28 ha/kW) Agrarfläche für den Energiepflanzenanbau binden.

8.2 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung in Deutschland

Entsprechend der Koalitionsvereinbarung vom September 2010 (BMWi-BMU, 2010) sollen die deutschen THG-Emissionen bis 2020 um 40% und bis 2050 um min. 80% (im Vgl. zu 1990) sinken. Dies soll durch Einsparungen beim Energieverbrauch (Effizienzsteigerung) und durch einen schrittweisen Umbau der Energieversorgung, weg von fossilen Brennstoffen und hin zu erneuerbaren Energien (Wind, Biomasse, Solar, Wasserkraft, Geothermie), geschehen. Nach den Folgen des Reaktorunglücks in Japan, im Januar 2011, wurde mit dem dreizehnten Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes (Bundestag, 2011) ein vorgezogener Zeitplan für die Abschaltung der deutschen AKW beschlossen. Dieser Umbau der Energieversorgung – auch als Energiewende bezeichnet – erfordert bis 2020 (gegenüber 2012) in etwa eine Verdoppelung der Energiegewinnung aus Biomasse.

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR 2011) geht für das Jahr 2020 von einem Primärenergiepotenzial für Biogas von 503 PJ aus. Diese 503 PJ können zu jeweils 67,2% aus nachwachsenden Rohstoffen, 20,9% Ernterückständen und Exkrementen, 9,3% kommunalen Reststoffen und 2,6% aus industriellen Reststoffen bereitgestellt werden.

Die Agentur für Erneuerbare Energien (AEE, 2012a) gibt für das Jahr 2011 eine installierte Leistung von ca. 5.500 MW (elektrisch + thermisch) und eine Anlagenzahl von 7.100 BGA an.

Eine Studie des DBFZ (Thrän, et al., 2011) prognostiziert bis zum Jahr 2020 einen weiteren Zubau von BGA, der je nach Szenario (Beachtung umwelt- und naturschutzrelevanter Aspekte) bei 12.250 (Basisszenario) bzw. 7910 (Umweltszenario) liegt. Im Basisszenario wird ein geringer technischer Fortschritt zugrunde gelegt und die bisherige Anlagenentwicklung fortgeschrieben. Ein langfristiges Absinken der Zahlungsbereitschaft für Biomasse bzw. mangelnde Flächen für deren Anbau führen in diesem Szenario letztendlich zu einer Abnahme des Zubaus.

Im Umweltszenario wird der Ausbau des Biogasanlagenbestandes durch technischen Fortschritt geprägt und die für Deutschland aufgestellten Nachhaltigkeits-, Umwelt- und Naturschutzziele werden erreicht.

Für das Jahr 2030 werden nach der DBFZ-Studie jeweils 18.610 (Basisszenario) und 10.170 (Umweltszenario) BGA prognostiziert.

Ein Blick auf den gegenwärtigen Trend des Anlagenbaus und die bereits 2011 installierte Leistung (ca. 7.000 Anlagen mit 5.500 MW) zeigt, dass der Anlagenbestand bis 2020 vermutlich nicht bei 7.910 Anlagen sondern darüber liegen wird und das Umweltszenario (DBFZ-Berechnung) vermutlich nicht eintreffen wird.

Bei einer Fortsetzung des Trends der letzten vier Jahre würden pro Jahr etwa 1.000 Anlagen zugebaut, und selbst bei einer Abflachung der Kurve des Zubaus und einer Neubaurate von jährlich 500 BGA käme man im Jahr 2020 auf eine Anlagenzahl von 11.000. Bei einer mittleren

Anlagenleistung von 388 kW (AEE, 2012a) wäre dann ein Ausbau der elektrischen Leistung von derzeit etwa 2800 MW (24,5 TWh) auf 4268 MW (37,4 TWh) erreicht.

Die 4.000 zusätzlichen BGA würden dann also 12,9 TWh p.a. in das Stromnetz einspeisen.

Im Jahr 2010 wurden ca. 38% des Stroms aus Biomasse durch Biogasanlagen erzeugt, die verbleibenden 62% stammten von biogenen Flüssig- und Festbrennstoffen, dem biogenen Anteil des Abfalls sowie aus Klär- und Deponiegas. Neben der Biogasnutzung (12,9%) leistet die Stromgewinnung aus biogenen Festbrennstoffen (holzartige Biomasse) mit 11,4% einen wichtigen Beitrag (FNR, 2011). Wenn davon ausgegangen wird, dass in beiden Sparten in den Jahren bis 2020 eine Verdoppelung der durch Biomasse generierten Leistung von etwa 40 TWh el. (im Jahr 2011 waren es etwa 33% von 125 TWh) (FNR, 2011) (BMU, 2011) stattfindet, dann entfallen davon 38% auf die Sparte Biogas (aus BGA). Der Anteil des Biogases an der angestrebten Verdoppelung bis 2020 läge also bei $0,38 * 40 \text{ TWh}$, also bei 15,2 TWh.

4.000 zusätzliche BGA mit einer mittleren Leistung von 388 kW reichen also nicht aus, um die Verdoppelung in der Stromerzeugung zu erreichen. Um die Ziele zu erreichen, muss entweder die mittlere Anlagengröße höher sein oder es müssen mehr als 4.000 Anlagen zugebaut werden.

Als andere Alternative kommt auch noch ein stärkerer Ausbau im Bereich der Stromgewinnung aus fester Biomasse in Frage.

Im Jahr 2010 lag der Anteil der festen Biomasse bei der Stromgewinnung bei 11,4% oder knapp unter 12 TWh.

2010 wurden aus biogenen Festbrennstoffen etwa 100 TWh (358 PJ) an Wärme erzeugt (FNR, 2011). Insgesamt wird allein das forstliche Brennstoffpotenzial auf 511 PJ geschätzt (BMVBS, 2010). Andere feste Brennstoffe, wie z. B. Altholz, Industrierestholz, Hackschnitzel aus KUP sowie importierte Holzpellets sind in dieser Zahl nicht enthalten.

Eine stärkere Ausweitung der Stromgewinnung durch Festbrennstoffe (> 100% gegenüber 2011) ist also durchaus denkbar und lässt sich auch aus der Entwicklung der installierten Leistung von Biomasseheizwerken über die letzten 10 Jahre ableiten (FNR, 2011).

Flächenbedarf

2011 wurden in Deutschland auf 800.000 ha Energiepflanzen für Biogasanlagen angebaut (FNR, 2012). Bei einer installierten Leistung (elektrisch) von 2.800 MW resultiert daraus ein Flächenbedarf von 0,28 ha pro kW. Da aber etwa 30% der Energie in den Anlagen aus dem Gülle-, Mist- und Abfallanteil gewonnen werden (eigene Berechnung), ergibt sich ein Flächenbedarf, der ungefähr bei 0,4 ha pro kW installierter elektrischer Leistung liegt.

Bei den Berechnungen zu der langfristig in Deutschland für den Nawaro-Anbau (energetisch und stofflich) zur Verfügung stehenden Fläche gehen die Annahmen von 2,5 bis 4 Mio. ha (BMU-BMELV, 2009)

Diese Spannweite lässt sich durch Unsicherheiten zu den Annahmen des Anteils der Nahrungsmittelproduktion, zu den Preisentwicklungen auf den Agrarmärkten sowie durch eventuelle Änderungen in den Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung erklären (siehe hierzu auch Kapitel 9). Für das Jahr 2020 kann nach verschiedenen Studien (BMU-BMELV, 2009) (BMVBS, 2010) von einem potenziellen Primärenergiebeitrag der agrarischen Biomasse in Höhe von 360 bis 860 PJ pro Jahr ausgegangen werden. Für die Schwankungsbreite sind verschiedene Annahmen zur Flächenproduktivität, der agrarpolitischen Förderung sowie Restriktionen im Bereich von Umwelt- und Naturschutz verantwortlich.

8.2.1 Potenziale für Biogas

Laut Nationalem Biomasseaktionsplan ist bis 2020 mit einem steigenden Bedarf an Flächen für die stoffliche Nutzung von Biomasse von etwa 500.000 ha zu rechnen (BMU-BMELV, 2009). Nach DBFZ-Report Nr. 4 (Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung) (Thrän, et al., 2011) ist für die Biokraftstoffgewinnung bis 2020 mit einem konstanten Flächenbedarf von etwa 1,2 Mio. ha zu rechnen. Dies ist begründet durch einen leichten Anstieg des Bedarfs der Anbaufläche für Pflanzen für die Ethanolproduktion und einen leichten Rückgang der Rapsanbaufläche für die Biodieselproduktion. Von maximal zur Verfügung stehenden 4 Mio. ha wären also 1,7 Mio ha. für die stoffliche Nutzung und die Bio-Treibstoffproduktion gebunden. Auf den verbleibenden 2,3 Mio. ha könnten bei einer Flächenproduktivität von 0,4 ha pro kW installierter BGA-Leistung jeweils 181 PJ (50 TW) elektrische und thermische Leistung generiert werden. Bei einer angenommenen Ertragssteigerung von 2% p.a. könnte die Gesamtmenge auf 427 PJ (119 TWh) ansteigen.

Wenn bei den beiden Berechnungen der Gülle-, Mist und Reststoffanteil hinzugenommen wird, ergeben sich Energieerträge p.a. von 518 PJ (144 TWh) ohne Ertragssteigerung und 609 PJ (169 TWh) mit Ertragssteigerung.

Im Bereich der energetischen Nutzung von Grünlandschnitt können etwa 100 PJ p.a. erwartet werden (BMU-BMELV, 2009) (BMVBS, 2010).

8.2.2 Potenziale Stroh

Sollte es zu einer großflächigen thermischen Verwertung des Strohs (Getreide, Raps) kommen, so liegen die Potenziale für diesen Energieträger bei 25 – 28 Mio. t pro Jahr (BMVBS, 2010).

Bei einem Energiegehalt von 4 kWh pro kg kann bei diesem Nutzungspfad mit einer Energieausbeute von 100 – 106 PJ (28 – 30 TWh) p.a. gerechnet werden.

8.2.3 Potenziale Treibstoffe

Bei einer Anbauflächenverteilung von 900.000 ha für Biodiesel (Raps) und 300.000 ha für Bioethanol (Stärkepflanzen) können bei Litererträgen von jeweils 1188 l/ha und 1657 l/ha und Energiedichten von 35,65 MJ/l und 21,06 l/ha (Zahlen aus FNR 2011) etwa 38 PJ p.a. für Rapsdiesel und 10 PJ p.a. für Bioethanol, also 49 PJ gewonnen werden.

Würde man auf der gleichen Fläche Pflanzen für die Biogasgewinnung anbauen und das Biomethan in den Kraftfahrzeugen einsetzen, ergäbe sich eine deutlich bessere Bilanz.

Der Literertrag von Biomethan liegt bei 5002 l/ha, die Energiedichte des Gases bei 36 MJ/l.

Bei einer Anbaufläche von 1,2 Mio. ha ergäbe sich ein Energieertrag von insgesamt 216 PJ pro Jahr, also um mehr als Faktor 4 höher als die Variante mit Rapsdiesel- und Bioethanolgewinnung.

8.2.4 Potenziale Holz

Die Potenziale des Waldenergieholzes werden nach BMVBS-Studie (BMVBS, 2010) auf etwa 500 PJ p.a. geschätzt. Zu diesen 500 PJ können laut der Studie noch 110 PJ p.a. für Altholz und 58 PJ p.a. für Industrierestholz hinzugerechnet werden.

Die Berechnungen zu den Potenzialen der Holzbiomassen aus dem Biomasseaktionsplan (BMU-BMELV, 2009) fallen jedoch mit einer Spanne von 270 – 320 PJ p.a. weit geringer aus.

Die Nutzung der Biomassepotenziale für Szenarien „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ (Tabelle 8.2.3.1) könnten im Jahr 2050 bei einem Primärenergiebedarf von 7.000 PJ p.a. (EWI, 2010) 22%, 29% oder 33% dieses Bedarfs abdecken.

Insgesamt ergeben sich also bei einer vollen Ausschöpfung der Flächenkapazitäten (3,5 Mio. ha) folgende Energiepotenziale aus dem Bereich der agrarischen und forstlichen Biomasse (Tabelle 8.2.3.1).

Eine Gemeinschaftsstudie von BGW (Bundesverband der deutschen Wasserwirtschaft) und DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs) (Wuppertal Institut, 2006) geht für 2020 und 2030 von einer Flächenverfügbarkeit für den Biomasseanbau (für Biogas) von 1,15 Mio. und 1,6 Mio. ha aus. Bei einer jährlichen Ertragssteigerungsrate von 2% errechnen sich Potenziale von 116 und 166 TWh (418 und 598 PJ) per anno. Diese Potenzialgrößen liegen zwar etwas niedriger, stimmen mit den oben angeführten Berechnungen und denen der BMVBS-Studie (je nach Szenario 501 – 860 PJ p.a.) (BMVBS, 2010) grob überein.

Nach Berechnungen des DBFZ, zitiert in Mühlendorf (Mühlendorf, 2011), stehen in Deutschland bis 2020 etwa 3,7 Mio. ha an Fläche für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung.

Tabelle 8.2.3.1(32): Minimum, Maximum und Mittel der potenziellen Biomasseerträge verschiedener Nutzungen und Nutzungspfade

Energieträger	Minimum	Mittel	Maximum
1. Energiepflanzen	362	395	427
2. Abf.- u. Reststoffe	156	169	182
3. 1 + 2 zusammen	518	564	609
4. Grünlandschnitt	100	100	100
5. Getreidestroh	100	103	106
6. Bioethanol	10	0	0
7. Biodiesel	0	38	0
8. Biomethan	54*	162**	216***
9. Holzaufkommen	270	469	668
Gesamt in PJ	1570	2000	2308

Gesamt in TWh	436	556	641
Verbrauch 2050	1944	1944	1944
Anteil in %	22	29	33

Alle Werte in PJ pro Jahr auf einer Anbaufläche von 3,5 Mio. ha und konstanter Waldfläche

*bei Substitution von Bioethanol **bei Substitution von Biodiesel *** nur Biomethan

Quellen: Eigene Berechnung und BMVBS, 2010 sowie BMU-BMELV, 2009

Die Berechnung dieser Größe setzt sich zusammen aus:

- Flächennutzung Bioenergie 2008: 1,6 Mio. ha
- Zuwachs durch Ertragssteigerung: +1 Mio. ha (bei etwa 1% p.a.)
- Zuwachs durch Nutzung von Brach- und sonst. Flächen: +0,8 Mio. ha
- Zuwachs durch demografisch bedingten Nachfragerückgang: +0,4 Mio. ha
- Verlust durch Flächenversiegelung: -0,1 Mio. ha

Die Agentur für Erneuerbare Energien (AEE, 2012b) geht sogar von Potenzialen von bis zu 7,3 Mio. ha für den Energiepflanzenanbau aus.

Ob es trotz dieser auf den ersten Blick positiv erscheinenden Bilanzierung und den Ausweitungsmöglichkeiten des NawaRo-Anbaus nicht doch zu einer Flächenverknappung und zu verschärften Nutzungskonkurrenzen kommen wird, bleibt abzuwarten.

In jedem Fall müssen eine Ausweitung der Bioenergienutzung und des Energiepflanzenanbaus stark an Nachhaltigkeitskriterien gebunden werden.

Hierzu zählen laut Bioökonomierat (BÖR, 2012) z. B. die Kaskadennutzung (erst stoffliche dann energetische Verwertung von Rohstoffen), die möglichst vollständige Ausschöpfung von Abfall- und Reststoffpotenzialen, die Einschränkung der als besonders ineffizient geltenden Nutzung von Biomasse für die Diesel- und Ethanolproduktion, die vermehrte Nutzung von Restflächen (Truppenübungsplätze, Altlastenflächen, Straßenseitenräume) sowie ein möglichst diverses Energiepflanzenanbauspektrum (Problematik mit Maisanbau).

8.3 Biomassepotenziale und Bioenergienutzung global

Bei der globalen Betrachtung von Biomassepotenzialen und der Bioenergienutzung fällt auf, dass bereits heute ein vergleichsweise hoher Anteil des Primärenergiebedarfs aus Biomasse abgedeckt wird (2008 waren es 10,2%) (BPB, 2012). Einen großen Anteil an dieser Bioenergienutzung haben allerdings traditionelle Nutzungsformen, wie die Verbrennung von Tierexkrementen und Holz zum Kochen (IEA, 2007) in wenig entwickelten Ländern im ländlichen Bereich. So entfielen z. B. 2004 84% der globalen Bioenergienutzung auf die Räume Asien (nicht OECD), Afrika, China und Lateinamerika (IEA, 2007).

Nach Schätzungen der FAO, zitiert in einer Kurzstudie der AEE (Piepzyk, 2009), findet derzeit weltweit auf etwa 30 Mio. ha der Anbau von Energiepflanzen statt. Da es sich bei der großmaßstäbigen Biogasnutzung bisher eher um ein deutsches Phänomen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass auf diesen Flächen hauptsächlich Energiepflanzen für die Bio-Treibstoffproduktion angebaut werden (BMVBS, 2010).

Zum Vergleich sind an dieser Stelle die globalen Landnutzungen dargestellt:

- Waldflächen: 4,0 Mrd. ha
- Degradierete Flächen: 3,5 Mrd. ha
- Weideflächen: 3,4 Mrd. ha
- Wüsten: 2,6 Mrd. ha
- Steppen: 1,5 Mrd. ha
- Ackerflächen: 1,5 Mrd. ha

Gesamtlandfläche: 12,9 Mrd. ha

Gemessen an der reinen Ackerfläche findet derzeit also auf etwa 2% der globalen Ackerfläche Energiepflanzenanbau statt. Im Bereich der Elektrizitätsgewinnung aus Biomasse ist laut IEA (IEA, 2007) von heute bis 2030 ein dynamischer Zuwachs zu erwarten. Laut IEA wird in diesem Zeitraum in etwa eine Vervierfachung (227 auf 983 TWh p.a.) der Stromgewinnung aus Biomasse eintreten. Allein in Deutschland werden derzeit mehr als 50 TWh p.a. an Strom durch Biomasse erzeugt.

Zu den globalen nutzbaren Biomassepotenzialen schwanken die Studien zwischen 200 und 500 Exajoule, mit Extremwerten von 40 bzw. 1470 EJ (BMU-BMELV, 2009).

Als langfristig und nachhaltig nutzbar können Potenziale im Bereich von 80 bis 170 EJ angesehen werden. Dies entspräche bis zum Jahr 2050 in etwa wieder 10% des sich bis dahin verdoppelnden globalen Primärenergiebedarfs. Diese Potenzialgrößen beinhalten sowohl die landwirtschaftlichen Biomassen und –Reststoffe als auch die forstlichen Biomassen und Siedlungsabfälle. Der WBGU (WBGU, 2009) geht von 104 EJ p.a. aus, die nachhaltig aus Biomasse zum Primärenergiebedarf beigesteuert werden können.

Die rein landwirtschaftlichen Biomassepotenziale (ohne Reststoffe) werden bis 2050 von der Studie des BMVBS (Bioenergieszenario) (BMVBS, 2010) auf etwa 22 EJ pro Jahr geschätzt. Alle Potenzialberechnungen legen jedoch immer bestimmte Annahmen zugrunde und müssen sich, um nicht ihren eigenen Umfang zu sprengen, auf eine begrenzte Anzahl von Szenarien festlegen. Die Biomassepotenziale der Zukunft werden stark von globalen Trends beeinflusst sein, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in vollem Umfang absehbar sind. Hierzu zählen die Einflüsse des Klimawandels auf die Landwirtschaft in den semi-ariden und ariden Gebieten der Erde, die Entwicklung der Ernährungsgewohnheiten, die Nachfrage und Produktion von Biosprit sowie der Umfang der Flächen, die unter Schutz gestellt oder mit Nutzungsrestriktionen belegt werden.

In Tabelle 8.3.1 ist einmal exemplarisch dargestellt, wie sich verschiedene Biomassenutzungspfade (Biogas, Bioethanol, Biodiesel) auf die Gesamtenergieerträge auswirken können.

Als kontrastierende Nutzungspfade für Energiebiomasse wurden die Ethanolproduktion, die Biodieselproduktion, die Biomethanproduktion (Biogas) und die thermische Verwertung (Verbrennung) gewählt. Anmerkend sei gesagt, dass es natürlich nicht darum geht, zwischen diesen vier Optionen zu entscheiden, sondern jeweils den am besten an die Gegebenheiten eines Landes oder einer Region angepassten Pfad zu nutzen.

In der ersten Spalte ist für Biogas mit 20, 45 und 60 Tonnen Frischmasse eine Ertragsspanne für Biomasseerträge angegeben. Für die mittlere Spalte, „Biodiesel und die Bioethanolproduktion pro Hektar Fläche“, wird für Deutschland mit Faktor eins (Ertragsniveau nach FNR, 2012), und mit den Faktoren 0,75 und 0,5 für Gegenden mit niedrigeren Erträgen gerechnet.

In den folgenden Spalten werden die Ertragsniveaus dann über Raumvolumen (Gas), Litervolumen (Kraftstoff) sowie Tonnen Trockenmasse (thermisch) über Energiegehalte und die Flächenbezugsgröße von 400.000 Mio. ha (etwa 8% der landwirtschaftlichen Nutzfläche) in Gesamtenergiemengen (TWh und EJ) umgerechnet.

Für die Biomethanproduktion (Vergärung in BGA) wurden 180 m³ Gas mit 55% CH₄-Anteil und 10 kWh pro m³ CH₄ zugrunde gelegt, das Ertragsniveau reicht von „niedrig“ (20t FM/ha) über „mittel“ und „hoch“ (45 – 60 t FM/ha). Bei der Biodiesel- und der Bioethanolproduktion wird von

Litererträgen von 1188 und 1657 pro ha ausgegangen (hohes Ertragsniveau) bzw. diese Erträge mit den Faktoren 0,75 und 0,5 (mittleres und niedriges Ertragsniveau) multipliziert.

Bei der thermischen Verwertung von Biomasse werden Ertragsniveaus von 7.000 (niedrig) über 14.000 (mittel) bis 20.000 (hoch) kg pro ha zugrunde gelegt. Der Brennwert von Biomasse wird mit 4 kWh pro kg angenommen.

Nach Energieeffizienz sortiert schneidet die thermische Verwertung von Biomasse am besten ab. Je nach Hektarerträgen können hier auf der vorgegebenen Fläche 40, 81 oder 115 EJ pro Jahr erzielt werden. Die zweitbeste Variante stellt die Nutzung der Fläche für die Biogasproduktion dar. Hier können, je nach Ertrag, 29, 64 oder 86 EJ pro Jahr gewonnen werden. Die beiden Nutzungspfade der Treibstoffgewinnung schneiden bei der Flächeneffizienz am schlechtesten ab.

Tabelle 8.3.1(33): Energieoutput verschiedener Biomassenutzungspfade

Nutzungspfad: Biogasproduktion					
FM t/ha	m ³ /t	CH4 %	kWh/m ³	TWh	EJ
20	180	0,55	10	7920	29
45	180	0,55	10	17820	64
60	180	0,55	10	23760	86
Nutzungspfad: Biodiesel					
% von BRD	l/ha	Mio. Tonnen	MJ/l	TWh	EJ
0,5	594	198	35,65	2353	8
0,75	891	298	35,65	3529	13
1	1188	397	35,65	4706	17
Nutzungspfad: Bioethanol					
% von BRD	l/ha	Mio. Tonnen	MJ/l	TWh	EJ
0,5	829	262	21,06	1939	7
0,75	1243	393	21,06	2908	10
1	1657	525	21,06	3877	14
Nutzungspfad: thermische Verwertung					
TM kg/ha	kWh/kg	Mrd. kWh		TWh	EJ
7000	4	11200		11200	40
14000	4	22400		22400	81
20000	4	32000		32000	115

Zugrunde gelegte Fläche: 400.000 Mio. ha (landwirtschaftlich)

Hier liegen die Erwartungen, je nach Ertrag und Kraftstoffpfad, zwischen 7 EJ und 17 EJ pro Jahr. In diesem Zusammenhang sei gesagt, dass selbstverständlich auch Biomethan als Treibstoff für Fahrzeugmotoren genutzt werden kann und dann auch im Bereich der Mobilität zu einer deutlich besseren Flächeneffizienz als bei Ethanol oder Biodiesel führt.

Der derzeitige globale Primärenergiebedarf liegt heute etwa bei 510 EJ und der Anteil der Kraftstoffe für den Mobilitätssektor liegt bei 121 EJ (Metzger & Hüttermann, 2009). Nach Piepyk (Piepyk, 2009) könnte auf 25% der degradierten Flächen (global ca. 3,5 Mrd.) lignocellulosehaltige Biomasse angebaut werden (Aufforstung), mit der dann bis zu 50% des globalen Treibstoffbedarfs gedeckt werden könnten. Legt man einen (Btl)-Literertrag von 3900 l/ha und einen Energiegehalt von 33,45 MJ/l zugrunde (FNR, 2012), so könnte über eine Aufforstung von 0,9 Mrd. ha degradierter Flächen und der Fischer-Tropsch-Synthese (BtL-Verfahren) tatsächlich in etwa die Hälfte des globalen Treibstoffbedarfs gedeckt werden. Ob ein Biomasseanbau, die Ernte der Biomasse und deren Weiterverarbeitung zu Treibstoff in diesen Größenordnungen allerdings realistisch durchführbar sind, das müsste allerdings noch weitergehend untersucht werden.

9 „Fleisch frisst Land“

Ernährungsgewohnheiten, Tierhaltung und Ökologie

"Nichts wird die Chance auf ein Überleben auf der Erde so steigern wie der Schritt zur vegetarischen Ernährung." **Albert Einstein**

9.1 Globale Nahrungsmittelverbrauchstrends

Die Tierproduktion, oder besser ausgedrückt als „Tierhaltung zum Zweck der Nahrungsmittelproduktion“ ist ein sich rasant entwickelnder Sektor der Landwirtschaft, dessen Entwicklung eng an die Entwicklung von Wohlstand in einzelnen Ländern oder auch an globale Entwicklungen gekoppelt ist.

So hat z. B. der Pro-Kopf-Nahrungsmittelverbrauch (alle Nahrungsmittel) vom Ende der 1960er Jahre bis 2000 in den Industrieländern um 13%, in den Entwicklungsländern um 26% und global betrachtet um etwa 16% zugenommen (Tabelle 9.1.1). In Ostasien war die Entwicklung mit einer Zunahme um 43% am höchsten, in den Schwellenländern gibt es einen Anstieg des Nahrungskalorienverbrauchs bis 1979/81 mit einer anschließenden leicht sinkenden Tendenz (dieses als Paradox erscheinende Phänomen erklärt sich durch zunehmende Verstädterung und einen höheren Anteil von Erwerbstätigkeiten außerhalb der Landwirtschaft (Campbell & Campbell, 2011)).

Tabelle 9.1.1(34): Entwicklung des Pro-Kopf Kalorienverbrauchs von 1969 – 2050 nach Weltregionen.

Quelle: FAOSTAT, 2006

Region	Pro-Kopf Nahrungsmittelverbrauch in kcal pro Tag							
	1969/71	1979/81	1989/91	1999/01	2015	2030	2050	% Änd.
Welt	2411	2549	2704	2789	2950	3040	3130	15,68
Entwicklungs-Länder	2111	2308	2520	2654	2860	2960	3070	25,72
Sub-Sahara Afrika	2100	2078	2106	2194	2420	2600	2830	4,48
- ohne Nigeria	2073	2084	2032	2072	2285	2490	2740	-0,05
Naher Osten /N-Afrika	2382	2834	3011	2974	3080	3130	3190	24,85
L.Amerika /Karibik	2465	2698	2689	2836	2990	3120	3200	15,05
Süd-Asien	2066	2084	2329	2392	2660	2790	2980	15,78
Ost-Asien	2012	2317	2625	2872	3110	3190	3230	42,74
Industrieländer	3046	3133	3292	3446	3480	3520	3540	13,13
Schwellenländer	3323	3389	3280	2900	3030	3150	3270	-12,73

Zieht man nun noch die Informationen aus Tabelle 9.1.2 hinzu, dann lassen sich außer dem generellen Trend zu einer höheren Nahrungskalorienzufuhr noch Entwicklungen, die durch Verschiebungen bei der Wahl der Nahrungsmittelwahl stattfinden (auch *engl. food transition* genannt) ablesen. Dieser Wandel der Ernährungsgewohnheiten tritt dann auf, wenn Länder oder

Gesellschaften sich in einem länger anhaltenden ökonomischen Aufwärtstrend befinden (Bengoa, 2001).

Betrachtet man den gesamten Zeitraum, von 1969/71 bis zur Projektion von 2050, dann lässt sich insbesondere für die Entwicklungsländer eine rasante Entwicklung zu einer stärker auf Lebensmitteln tierischen Ursprungs basierten Ernährung festmachen. Ausgehend von der Basis der Statistik (1969/71) bis 2050 findet hier eine Zunahme des Fleischkonsums von 10,7 kg pro Kopf und Jahr hin zu 44 kg pro Kopf und Jahr statt. Das ist eine Zunahme um 400%. Auch bei den Milchprodukten findet eine 270%ige Zunahme statt. Selbst ausgehend vom Zeitraum 1999/01 liegt der Anstieg noch bei +65% und +73%. Für die Industrieländer entspricht die Entwicklung beim Fleisch- und Milchproduktekonsum im selben Zeitraum in etwa dem Gesamtanstieg der Kalorienaufnahme und liegt bei 14% (Fleisch) und 6% (Milchprodukte). In den Schwellenländern soll nach der FAO-Prognose von 1999/01 bis 2050 ein Anstieg beim Fleisch- und Milchproduktekonsum von jeweils 53% und 20% stattfinden – der Aufholprozess ist hier geringer als in den Entwicklungsländern. Einhergehend mit einer Zunahme des Konsums von tierischen Lebensmitteln ist eine gleichzeitige Abnahme bzw. nur geringfügige Zunahme bei kohlehydrathaltigen Nahrungsmitteln wie Getreide oder Knollen sowie bei pflanzlichen Proteinquellen, wie den Hülsenfrüchten.

Für die Entwicklungsländer sinkt der Getreidekonsum (als direktes Lebensmittel) zwischen 1999/01 und 2050 (165,7 auf 163 kg). Auch bei Wurzeln und Knollen ist kaum Zuwachs zu verzeichnen (67 auf 77 kg). Ebenso ist bei den Hülsenfrüchten kaum eine Erhöhung zu erwarten (6,7 auf 7 kg). Nur wenn die Entwicklung des Getreideverbrauchs insgesamt betrachtet wird, lässt sich ein deutlicher Zuwachs von 1999/01 bis 2050 ausmachen (238 bis 279 kg). Dieser Zuwachs ist dem steigenden Bedarf für Futtermittel für den wachsenden Sektor der Tierproduktion zuzuschreiben. In den Industrieländern und den Schwellenländern lässt sich ein ähnlicher Trend beim Getreideverbrauch feststellen (162,4 auf 156 kg bzw. 168,7 auf 158 kg für Lebensmittelgetreide). Auch der Gesamtgetreideverbrauch steigt kräftig an, wenn auch auf einem deutlich höheren Niveau (591,8 bis 665 kg und 499,1 auf 688 kg). Der doch sehr deutliche Anstieg des Gesamtgetreideverbrauchs in den Schwellenländern von 499,1 auf 688 kg (entspricht etwa +38%) lässt auf einen starken Zubau im industriellen Tiermastsektor in Ländern wie Brasilien, China oder Argentinien schließen.

Tabelle 9.1.2(35): Entwicklung des Lebensmittelbedarfs von 1969/71 bis 2050 nach Kategorien und Ländergruppierungen in kg pro Kopf und Jahr (Werte von grün nach rot ansteigend)

Lebensmittel in kg/Kopf/Jahr	Welt						Industrieländer					
	1969/71	1979/81	1989/91	1999/01	2030	2050	1969/71	1979/81	1989/91	1999/01	2030	2050
Getreide (Lebensmittel)	148,7	160,1	171	165,4	165	162	132,3	139,4	154,4	162,4	159	156
Getreide (alle Nutzungen)	302,8	325	329,3	308,7	331	339	531,1	542	543,7	591,8	641	665
Wurzeln und Knollen	83,7	73,4	64,5	69,4	75	75	74,2	67,1	69,4	66,7	61	57
Rohzucker	22,4	23,4	23,3	23,6	26	27	40,5	36,7	32,6	33,1	32	32
Hülsenfrüchte (trocken)	7,6	6,5	6,2	5,9	6	6	3,4	2,8	3,2	3,6	4	4
Pflanzenöle, Samen, Produkte	6,8	8,3	10,3	12	16	17	13,2	15,7	18,5	21,5	24	24
Fleisch (Schlachtgewicht)	26,1	29,5	33	37,4	47	52	69,7	78,5	84,3	90,2	99	103
Milch (ohne Butter)	75,3	76,5	76,9	78,3	92	100	189,1	201	211,2	214	223	227
Sonstige (kcal/Pers/Tag)	216	224	241	289	325	340	486	500	521	525	565	580
Gesamt (kcal/Pers/Tag)	2411	2549	2704	2789	3040	3130	3046	3133	3292	3446	3520	3540

Lebensmittel in kg/Kopf/Jahr	Entwicklungsländer						Schwellenländer					
	1969/71	1979/81	1989/91	1999/01	2030	2050	1969/71	1979/81	1989/91	1999/01	2030	2050
Getreide (Lebensmittel)	146,3	161,7	173,7	165,7	166	163	200,5	189,2	179,1	168,7	164	158
Getreide (alle Nutzungen)	191,8	219,1	238,6	238	268	279	653	777,6	767,8	499,1	618	688
Wurzeln und Knollen	78,8	69,6	60,1	67	75	77	140,2	118,4	97,1	103,3	99	94
Rohzucker	14,7	17,5	19,2	20,7	25	26	41,9	45,9	43,4	36,5	39	41
Hülsenfrüchte (trocken)	9,2	7,8	7,3	6,7	7	7	4,1	3,1	2,3	1,6	2	2
Pflanzenöle, Samen, Produkte	4,9	6,5	8,6	10,4	14	16	7,4	9,2	10,2	10,1	15	18
Fleisch (Schlachtgewicht)	10,7	13,7	18,2	26,7	38	44	49,5	62,9	70,7	44,4	59	68
Milch (ohne Butter)	28,6	34	38,1	45,2	67	78	185,7	181,3	177,2	160,2	179	193
Sonstige (kcal/Pers/Tag)	123	140	171	242	285	300	331	372	333	317	365	390
Gesamt (kcal/Pers/Tag)	2111	2308	2520	2654	2960	3070	3323	3389	3280	2900	3150	3270

Quelle: FAOSTAT 2006

9.2 Ökologische Problematiken im Bereich der Tierproduktion

Aus den in Abschnitt 9.1 dargestellten Zahlen zur bisherigen und zur prognostizierten Entwicklung des Nahrungsmittelbedarfs und der *food transition* in den Schwellen- und Entwicklungsländern lässt sich eine Entwicklung in der globalen Nahrungsmittelproduktion ableiten, die eine ganze Reihe von ökologischen Problemen im Agrarbereich entweder verschärfen oder neu kreieren wird.

In diesem Zusammenhang nennt der FAO-Bericht „Livestocks Long Shadow“ (FAO, 2006) zum Beispiel:

- die Zunahme von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), sowohl aus der Landwirtschaft an sich, als auch direkt aus der Tierhaltung
- die zunehmende Flächeninanspruchnahme (z. B. gedeckt über Waldrodungen) für die Bereitstellung von Futtermitteln
- Artenrückgang
- vermehrte Gewässer- und Bodenbelastung durch Tierexkremate aus industrieller Tierhaltung

In demselben Bericht wird davor gewarnt, dass eine Verdoppelung des Fleischkonsums bis 2050 nur tragbar sein wird, wenn die Wirkfaktoren der Tierhaltung und der Tierproduktion im selben Zeitraum halbiert werden können. Ob dies machbar ist, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet. Dass es aber durchaus sinnvoll ist, dem ungebremsten Zuwachs der Tierproduktion und des Konsums von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft entgegenzusteuern, soll in den Abschnitten 9.2.1 bis 9.4 aufgezeigt werden.

9.2.1 Flächenverbrauch, -Umnutzung und -Degradation

Der Tierhaltungssektor, oder auch „Livestock-Sektor“ wie er im internationalen Sprachgebrauch genannt wird, ist mit Abstand der größte anthropogene Landnutzer schlechthin. Die Gesamtfläche, die weltweit für Weideflächen in Anspruch genommen wird, liegt bei 26% der eisfreien Landoberfläche. Zusätzlich werden 33% aller Ackerflächen für die Futtermittelproduktion in Anspruch genommen. Insgesamt belegt die Tierproduktion etwa 70 - 80% der globalen kulturfähigen Landoberfläche und etwa 30% der gesamten Landoberfläche des Planeten (FAO, 2006) (Koerber, et al., 2009). Diesem hohen Flächenanteil steht in einem Missverhältnis gegenüber, dass die tierischen Nahrungsmittel lediglich 17% der weltweiten Nahrungsversorgung abdecken (FAOSTAT, 2008 zitiert in Koerber et. al. 2009).

Allein in Deutschland werden 60% allen Getreides an Tiere verfüttert (Witzke, et al., 2011), in den USA sind es 66% des Getreides und weltweit 37% (Horrigan, et al., 2002).

Für die Fütterung und Mast der Tiere in der deutschen Tierproduktion wurden 2008/2009 70 Mio. Getreideeinheiten (GE) an Nutztiere verfüttert. Eine GE entspricht dabei 100 kg Getreide. Über 30 Mio. t entfallen hierbei auf Grünfutter und Stroh, 27 Mio. t aus Getreidekulturen und etwas mehr als

12 Mio. t auf andere Kulturarten (in erster Linie Ölsaaten und in geringem Umfang Hackfrüchte) (Witzke, et al., 2011). In Deutschland wird Grünfutter vornehmlich auf den etwa 4,7 Mio. ha Dauergrünland produziert, jedoch werden für die Grünfutterproduktion auch 2,5 Mio. ha des Ackerlandes verwendet. Somit entfallen 7,1 Mio. ha oder 43% der zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche (2010 waren es 16,5 Mio. ha) auf die Grünfutterproduktion.

(Witzke, et al., 2011). Anders hingegen verhält es sich beim Kraftfutter, denn für dessen Produktion werden mehr als 25% der Zutaten aus dem Ausland importiert (Witzke, et al., 2011).

Dieser Agrarhandel oder auch virtuelle Landhandel, der über diese Futtermittelimporte stattfindet, lag in den vergangenen Jahrzehnten für die Europäische Union häufig bei mehr als 30 Mio. ha, wovon 20 Mio. ha in Südamerika liegen. Im Zeitraum 2008 bis 2010 war Deutschland mit fast 7 Mio. ha, also 25% an diesem Landhandel beteiligt und nahm somit noch einmal 40% seiner eigenen Agrarfläche außerhalb der EU in Anspruch (Witzke, et al., 2011).

Zurzeit werden in Südamerika jährlich fast 4 Mio. ha Wälder gerodet, z. B. um auf dem Land Sojabohnen für den Export nach Europa anzubauen (Witzke, et al., 2011). Laut FAO-Bericht (FAO, 2006) werden heute auf 70% der ehemals mit Wäldern bedeckten Flächen im Amazonasraum Tiere geweidet und auf den verbleibenden 30% hauptsächlich Futtermittel angebaut.

Nach selbigem FAO-Bericht sind weltweit etwa 20% aller Weide- und Graslandflächen durch Überweidung degradiert. Für die Graslandflächen in den Trockengebieten sind es sogar 73% (FAO, 2006).

9.2.2 Treibhausgasemissionen

Der Agrarsektor trägt heute mit 8,5 bis 16,5 Pg CO₂e (CO₂-Äquivalente) oder 17 bis 32% der Gesamtmenge in erheblichem Umfang zum Gesamtausstoß von anthropogenen Treibhausgasen bei. Aufgeschlüsselt nach Emissionsquellen sind es 6 bis 17% für Landnutzungsänderungen (CO₂-Freisetzung), 10 bis 12% direkte Methan- und Stickoxidgase, 0,2 bis 1,8% für Betriebsabläufe (Höfe) und 0,6 bis 1,2% für Düngerproduktion und -distribution (Bellarby, et al., 2008). Direkt steuert die Landwirtschaft etwa 5,1 bis 6,1 Pg CO₂e oder 10 bis 12% zu den globalen Treibhausgasemissionen bei, hauptsächlich in Form von Lachgas (N₂O), 2,8 Pg CO₂e und Methan (CH₄) 3,3 Pg CO₂e. Der Nettostrom von CO₂ ist mit 0,04 Pg CO₂e vergleichsweise gering (Bellarby, et al., 2008). Koerber et al. (Koerber, et al., 2009) geben den globalen Ausstoß von N₂O und CH₄ mit 5,969 Pg CO₂e an, wobei hiervon 74% und 26% jeweils auf die Entwicklungs- und die entwickelten Länder entfallen. N₂O- und CH₄-Emissionen sind mit 38% und 32% die größten nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft, wobei das CH₄ aus der Verdauung von Wiederkäuern stammt und das N₂O durch die oftmals übermäßige Bodendüngung von Agrarflächen entsteht. Nach Eickhout et al. (Eickhout, et al., 2006) gehen etwa 50% des aufgebrauchten Düngers über den Boden und als N₂O in die Atmosphäre oder als Nitrat in Grundwasser und Oberflächengewässer verloren.

Die hohen Produktivitätszuwächse der vergangenen Jahrzehnte sind in erster Linie durch Intensivierung und nicht durch Flächenausweitung geschaffen worden (Mekonnen & Hoekstra, 2010). So ist z. B. der Verbrauch von Stickstoffdünger von 1960 bis 2005 um 800% angestiegen.

Für den Zeitraum 1990 bis 2005 sind die CH₄- und die N₂O-Emissionen um 17% angestiegen und sollen, so die Prognose, durch den wachsenden Tierproduktionssektor und vermehrte Stickstoffdüngung bis 2030 noch einmal um 35 bis 60% ansteigen (Bellarby, et al., 2008).

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass der steigende globale Bedarf an Nahrungsmitteln (steigende Weltbevölkerung und steigender Wohlstand) sowie veränderte Ernährungsgewohnheiten - hin zu mehr Nahrungsmitteln tierischer Herkunft – einerseits zu einer Intensivierung der Landwirtschaft (die Flächeneinheit muss mehr Ertrag abwerfen) und andererseits zu einer Ausweitung der Agrarflächen auf Kosten von Wäldern oder Savannen (wie in Südamerika zu beobachten) führen werden (Witzke, et al., 2011) (Bellarby, et al., 2008). Somit lässt sich festhalten, dass ähnlich wie der weltweit stark expandierende Verkehrssektor (arbeitsteilig bedingtes globales Transportwesen, Zunahme der Motorisierung in Schwellen- und Entwicklungsländern) auch die globalisierte Landwirtschaft ein Hauptverursacher von Treibhausgasen ist. In diesem Zusammenhang sind die Steigerung der Produktivität (u.a. durch hohe Stickstoffdüngung)(N₂O-Emissionen), die Flächenausweitung (CO₂-Emissionen) sowie die Zunahme im Bereich der Tierhaltung (CH₄-Emissionen) zu nennen. Eine FAO-Studie (zitiert in Koerber et al. 2009) gibt den Gesamtbeitrag der Tierhaltung zum Treibhausgasausstoß mit 18% an. Wobei hier schon die Vorleistungsproduktion (Dünger, Futtermittel) und die Flächenumnutzung enthalten sind. Die meisten Studien beziffern den Gesamtbeitrag der Landwirtschaft zu den THG-Emissionen zwischen 10 und 35%, je nachdem, ob hier Landnutzungsänderungen oder Waldrodungen schon eingerechnet sind (UNEP, 2012).

Der steigende Bedarf an Nahrungsmitteln insgesamt sowie die steigende Nachfrage nach Lebensmitteln tierischer Herkunft wirken hierbei als die treibenden Kräfte.

Koerber et al. (Koerber, et al., 2009) zitieren eine Studie des *Institute for Prospective Technological Studies*, nach der 22 bis 31% des europäischen CO₂-Ausstoßes durch die Kategorie „Lebensmittel, Getränke und Tabak“ verursacht werden. Für Deutschland wird diese Kategorie bei einem CO₂-Anteil an den Gesamtemissionen von etwa 20% angesiedelt. Bei der Betrachtung einzelner Lebensmittel fällt auf, dass Nahrungsmittel tierischen Ursprungs die höchsten THG-Emissionen pro kg Produkt aufweisen (Tabelle 9.2.2.1). Auch lässt sich nicht unbedingt sagen, dass eine vegetarische Ernährungsweise in jedem Falle besser als eine nichtvegetarische sein muss, z. B. wenn diese viele Milchprodukte enthält (siehe CO₂e von Käse in Tabelle 9.2.2.1). Die Studie von Bellarby et al. mahnt dringend an, die tierhaltungsbedingten THG-Emissionen durch gezielte Strategien zu verringern. Die größten Minderungspotenziale werden dem Bericht zufolge in der Acker- und Weidelandbearbeitung (engl. *management*) sowie in der Wiederherstellung bereits kultivierter organischer Böden gesehen

(jeweils etwa 1,4 Pg CO₂e). Das direkte Minderungspotenzial für CH₄-Emissionen in der Tierhaltung wird mit 0,24 Pg CO₂e, ähnlich wie beim Reisanbau-Management, als relativ gering eingestuft.

Tabelle 9.2.2.1(36): THG-Emissionen verschiedener Lebensmittel tierischen und pflanzlichen Ursprungs.

Quelle: GEMIS, zitiert in Koerber et al. 2009, CO₂e = CO₂-Äquivalente

CO ₂ e in g/kg Produkt			
Tierisch		Pflanzlich	
Rindfleisch	13.300	Speiseöl	1.890
Käse	8.500	Tofu	1.100
Rohwurst	7.820	Teigwaren	920
Geflügelfleisch	3.490	Brot	720
Schweinefleisch	3.250	Obst	450
Eier (Freiland)	2.570	Weizenkörner	415
Frischkäse	1.930	Kartoffeln	200
Milch	940	Gemüse	150

9.2.3 Der Wasser-Fußabdruck der Tierhaltung (Ökobilanzierung des Wasserverbrauchs)

Die globale Tierproduktion benötigt etwa 2.422 Gm³ Wasser pro Jahr. Hiervon sind 87,2% Grünwasser, 6,2% Blauwasser und 6,6% Grauwasser. Grün-, Blau- und Grauwasser werden von Bauer und Zapp (2004, zitiert in Feifel et al., 2009) folgend definiert:

Grünwasser: Ausschließlich Regenwasser, das von einer Feldfrucht oder einem Betrieb am Punkt des Niederschlags direkt genutzt wird.

Blauwasser: Wasser, das einem Wassereinzugsgebiet entzogen und nicht in selbiges zurückgeführt wird, da es beispielsweise durch Evapotranspiration verloren geht.

Grauwasser: Wasser, das benötigt wird, um Emissionen aufzunehmen und in so verdünnter Form an die Umwelt abzugeben, dass es dem aquatischen Ökosystem nicht schadet.

Der weitaus größte Teil dieses Wassers fällt bei der Futterproduktion an (98%), die restlichen 2% entfallen auf Trinkwasser, Mischwasser für Futter sowie Service-Wasser (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Bei der Produktion von Tierfleisch und Milchprodukten existieren große Unterschiede hinsichtlich der Wasserintensität einer erzeugten Produktmengeneinheit (kg Fleisch oder Liter Milch).

Um ein kg Rindfleisch zu erzeugen, benötigt man durchschnittlich (falls nicht anders angegeben, ist immer der globale Durchschnitt gemeint) 15.400 Liter Wasser. Für ein kg Schaffleisch sind es 10.400 Liter, für Schweinefleisch 6.000 Liter, Ziege 5.500 Liter und Huhn 4.300 Liter. Für Hühnereier sind es 3.300 Liter pro kg und für Kuhmilch 1.000 Liter pro kg Milch (Mekonnen & Hoekstra, 2010). Mekonnen et al. berechnen diese Wasserverbrauchsparameter in erster Linie über Futter-Konversionsfaktoren, also wie effizient ein Tier Futtermasse in Produktmasse (Tierfleisch) umwandelt und welches Futter das Tier hauptsächlich zu fressen bekommt.

Wiederkäuer haben gegenüber Schweinen oder Hühnern eine deutlich schlechtere Futtermittelverwertung (Tabelle 9.2.3.1)

Tabelle 9.2.3.1(37): Futter-Konversionseffizienz für verschiedene Tier- und Produktionsarten.

Quelle: Mekonnen et al., 2010

Futter-Konversionseffizienz in kg Trockenmasse pro kg Produkt

Tierkategorie	grasend	gemischt	industriell	gesamt
Rind (Fleisch)	70,1	51,8	19,2	46,9
Milchkuh	3,5	1,6	1,1	1,9
Masthuhn	9,0	4,9	2,8	4,2
Legehennen	9,3	4,4	2,3	3,1
Schwein	11,3	6,5	3,9	5,8
Schaf / Ziege	49,6	25,8	13,3	30,2

Allerdings kommt bei den Wiederkäuern (Rinder, Schafe, Ziegen) oft ballaststoffreiches Futter (Gras, Grünfutter) zum Einsatz, bei den Nicht-Wiederkäuern sind es mehr Kraftfutter (engl. *concentrate feeds*). Die Zutaten des Kraftfutters (Getreide, Soja) werden auf Ackerflächen und oft mit hohem Einsatz von Wasser angebaut und stehen somit in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Die Wiederkäuer ernähren sich oft durch Gras und Weiden und nutzen somit Biomasse, die nicht für den menschlichen Verzehr geeignet ist (keine Konkurrenz). Und eben aufgrund dieser Tatsache verbessert sich die Bilanz der Wassernutzungseffizienz zugunsten der Wiederkäuer, und die Abstände (in Litern Wasser pro kg Produkt) zu Schwein und Huhn verringern sich.

Hinsichtlich des Wasserverbrauchs bei der Tierproduktion ist es nun sinnvoll, diese Werte (siehe oben) in einen Vergleichskontext zu pflanzlichen Nahrungsmitteln zu setzen (Tabelle 9.2.3.2).

Um ein kg Gemüse zu produzieren, werden im globalen Mittel 322 Liter Wasser benötigt, für stärkehaltige Knollen und Wurzeln (z. B. Kartoffeln) sind es 387, für Getreide 1.644 Liter, für Ölfrüchte 2.364 Liter, für Hülsenfrüchte 4.055 Liter und für Nüsse 9.063 Liter. Ein Augenmerk sei

hierbei auf die Hülsenfrüchte (Linsen, Erbsen, Bohnen) gerichtet, da diese z. B. als alternative Eiweißlieferanten dienen können.

Eine weitere Kultur, aus der eiweißhaltige Nahrungsmittel gewonnen werden können, ist die Sojabohne. Um ein kg Sojabohnen zu produzieren, benötigt man 2.145 Liter Wasser. Aus 1 kg Sojabohnen lassen sich 2 kg Tofu (Sojakäse) herstellen. Tofu ist in Ostasien ein traditionelles Nahrungsmittel und enthält etwa 13 Gramm Proteine pro 100 g. Mit 2.145 Litern Wasser können also 2 kg Tofu mit einem Eiweißgehalt von 260 g gewonnen werden. Um 260 g tierisches Eiweiß zu erzeugen, benötigt man, je nach Fleischsorte, etwa 1,7 kg Fleisch und somit deutlich mehr Wasser. Auch bei den anderen pflanzlichen Nahrungsmitteln liegt der Wasser-Fußabdruck, wenn er auf deren Nährwert oder Proteingehalt bezogen wird, in der Regel unter dem der tierischen Nahrungsmittel. Ausnahme bilden hier Nüsse und Früchte (vgl. Tabelle 9.2.3.2).

Als kurze Zwischenbilanz soll diese Gegenüberstellung dienen, detaillierter wird auf den Vergleich von pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln (Nährwert, Effizienz) in Abschnitt 9.4 eingegangen.

Tabelle 9.2.3.2 (38): Wasserverbrauch in Litern pro Nährwerteinheit versch. Lebensmittel.

Mekonnen et al., 2010

	WFA*		Nährwert		Liter pro Nährwerteinheit		
	l/kg	Kcal/kg	Protein	Fett	l/Kcal	Protein	Fett
			(g/kg)	(g/kg)		(l/g)	(l/g)
Gemüse	322	240	12	2,1	1,34	26	154
Knollen/Wurzeln	387	827	13	1,7	0,47	31	226
Früchte	962	460	5,3	2,8	2,09	180	348
Getreide	1644	3208	80	15	0,51	21	112
Ölfrüchte	2364	2908	146	209	0,81	16	11
Hülsenfrüchte	4055	3412	215	23	1,19	19	180
Nüsse	9063	2500	65	193	3,63	139	47
Milch	1020	560	33	31	1,82	31	33
Eier	3265	1425	111	100	2,29	29	33
Hühnerfleisch	4325	1440	127	100	3	34	43
Butter	5553	7692	0	872	0,72	0	6,4
Schweinefleisch	5988	2786	105	259	2,15	57	23
Schaf/Ziegenfl.	8763	2059	139	163	4,25	63	54
Rindfleisch	15415	1513	138	101	10,19	112	153

* Wasserfußabdruck

9.2.4 Flächenbedarf und ökologischer Fußabdruck tierischer und pflanzlicher Nahrungsmittel

Dass die Erzeugung von Fleisch als Nahrungsmittel hinsichtlich des Flächenbedarfs und Ressourcenverbrauchs weniger effizient ist als die Produktion von pflanzlichen Nahrungsmitteln, ist schon lange bekannt. Wie nun genau das Verhältnis beider Nahrungsmittelgruppen zueinander aussieht, soll in diesem Abschnitt näher erläutert werden.

Der globale Flächenbedarf für die Produktion von tierischen Lebensmitteln ist hoch und wurde in Abschnitt 9.2.1 bereits thematisiert. Auch bei der genaueren Betrachtung einzelner Lebensmittel, ihrem produktionsbedingten Flächenbedarf oder ihrem ökologischen Fußabdruck schneiden pflanzliche Nahrungsmittel durchweg besser ab als die aus tierischer Produktion.

In einer Studie der Cornell Universität (Zitiert in Koerber et al., 2009) wurden verschiedene Ernährungsweisen hinsichtlich ihres Flächenbedarfs untersucht. Hiernach beansprucht eine fleischlose Ernährung 0,18 ha Acker- und Weideland pro Person und Jahr. Die Ernährungsweisen mit mittlerem und hohem Fleischanteil lagen mit 0,48 ha und 0,86 ha pro Person und Jahr deutlich darüber. Hierzu muss jedoch gesagt werden, dass in bestimmten Fällen eine rein vegane (ohne jegliche tierische Lebensmittel) Ernährung u. U. mehr Fläche in Anspruch nehmen kann als eine mit gemäßigttem Fleischkonsum. Dieser Fall tritt dann ein, wenn viel Weideland und wenig Ackerland in einem Gebiet zur Verfügung stehen. Hauptgrund hierfür ist, dass Wiederkäuer auch Weideland nutzen können, der sich vegan ernährende Mensch jedoch nicht. Dies könnte jedoch z.B. mit einer vegetarischen Ernährungsweise (Nutzung von Milchprodukten) umgangen werden. Die Flächenbedarfswerte der Studie zugrunde gelegt worden sind finden sich in Tabelle 9.3.1.

Eine Studie der Universität Groningen (zitiert in Koerber et al., 2009) untersuchte den Flächenbedarf durch das tägliche Essen und Trinken der niederländischen Bevölkerung (es wurden sowohl Flächeninanspruchnahmen im In- als auch im Ausland berücksichtigt). Insgesamt benötigt jede Person 0,145 ha/Jahr, wovon 46% auf Fleisch- und Milchprodukte entfallen, 11% auf Getränke und lediglich jeweils 5% auf die Grundnahrungsmittel (z. B. Gemüse, Kartoffeln und Obst) und 5% auf Brot.

Nahezu die Hälfte des Flächenbedarfs entfällt auf nur sechs Lebensmittel (in absteigender Reihenfolge): Margarine, Hackfleisch, Wurst, Käse, Bratfette und Kaffee.

Eine weitere Studie der Universität Groningen (zitiert in Koerber et al., 2009) generierte als Vergleichsgröße sog. Landeinheiten (LE) des Nahrungsmittelverbrauchs. Als Vergleichsgröße dient der niederländische Durchschnittsverzehr, dem ein Wert von 100 LE zugewiesen wurde. Je nach Land variiert die LE-Größe in Europa. In Portugal werden 95 LE benötigt, in Deutschland sind es 98 LE und in Dänemark 130 LE. Dänemark ist auch beim Fleischkonsum mit 111 kg pro Kopf und Jahr europäischer Spitzenreiter (Witzke, et al., 2011).

Die Studie aus Groningen hat laut den Autoren gezeigt, dass neben dem Konsum von Fleisch auch der Konsum von Milchprodukten, pflanzlichen Fetten, Genussmitteln und Getränken große Flächen in Anspruch nimmt.

Koerber et al. (2009) zitieren eine weitere Studie aus Großbritannien, in der der ökologische Fußabdruck der Stadt Cardiff (Wales) untersucht wurde. Insgesamt liegt der ökologische Fußabdruck (ÖFA) der Stadt etwa 3-mal so hoch wie weltweit verträglich. Essen und Trinken sind für 25% des ÖFA verantwortlich, von diesen 25% werden 61% durch Fleisch- und Milchprodukte und 13% durch Getränke verursacht. Nach dem Oktoberbericht der GEAS (Global Environmental Alert Service) können mit einer weiter steigenden Weltbevölkerung Klimaschutzziele für das Jahr 2050 nur dann erreicht werden, wenn der Pro-Kopf-Verbrauch von Fleisch 70-90 g/Tag nicht übersteigt. In den meisten Industrieländern liegt dieser jedoch oft um das Doppelte oder Dreifache über dieser Grenze, und in Ländern wie China findet diesbezüglich eine rasante Aufholjagd statt (UNEP, 2012).

Tabelle 9.3.1(39): Flächenbedarf für die Produktion von verschiedenen Lebensmitteln

Quelle: Koerber et al., 2009

Flächenbedarf in m² pro 1000 kcal

Tierische Nahrungsmittel		Pflanzliche Nahrungsmittel	
Rindfleisch	31,2	Ölfrüchte	3,2
Geflügelfleisch	9,0	Obst	2,3
Schweinefleisch	7,3	Hülsenfrüchte	2,2
Eier	6,0	Gemüse	1,7
Vollmilch	5,0	Getreide	1,1

9.3 Gesundheitsrisiken eines hohen Fleischkonsums

Seit der Entdeckung des Proteins (griech. *Proteios* „grundlegend“ „vorrangig“) durch den Holländer Gerhard Mulder 1839 hat dieser wichtige Baustein unserer Ernährung und die Menge, die man täglich hiervon aufnehmen sollte, zu allerlei Spekulation und Verwirrung geführt (Campbell & Campbell, 2011). So war z. B. schon recht früh bekannt, dass man etwa 50 Gramm Protein täglich aufnehmen sollte, um nicht unterversorgt zu sein. Allerdings wurde dieser Stickstoffverbindung so eine Bedeutung zugeschrieben, dass sich schnell die Auffassung verbreitete, dass mehr „mehr hilft“. Das Protein aus tierischen Quellen wurde als hochwertiger angesehen (dies gilt heute als wiederlegt), und eine hohe Aufnahmemenge dessen wurde mit einem mehr an Gesundheit, Kraft und einer verbesserten körperlichen Entwicklung in Verbindung gebracht (Campbell & Campbell, 2011). Entgegen dieser Annahmen haben diverse neuere Studien aus dem 20. Jahrhundert gezeigt, dass deutliche Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von diversen sog. Wohlstandserkrankungen und

einer hohen täglichen Aufnahmemenge von Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs existieren. In diesem Kontext zu nennen sind z.B. Herz-Kreislaufkrankungen (Bluthochdruck, Arteriosklerose), Brust-, Dickdarm-, Leber- und Prostatakrebs, Autoimmunerkrankungen sowie der Diabetes und ihren Folgeerkrankungen (Campbell & Campbell, 2011). Als wegweisende und groß angelegte Studien für die Erforschung dieser Zusammenhänge sind hier die Framingham-Herzstudie (1948 – heute) sowie das China-Cornell-Oxford Project (China Study 1 und 2) (1980er Jahre bis heute) zu nennen. Im Rahmen der Framingham-Studie wurden 5000 Männer und Frauen über viele Jahre hinweg beobachtet, um die Entstehung von Herzerkrankungen zu erforschen. Ein wichtiger Meilenstein der Forschung in dieser Studie war z. B. die Entdeckung des Zusammenhangs zwischen der Cholesterinaufnahme, den Blutcholesterinwerten des „schlechten“ und des „guten“ Cholesterins (LDL, HDL) und dem Auftreten von Herz-Kreislaufkrankungen. Für die Einordnung in den Kontext muss an dieser Stelle gesagt sein, dass eine Ernährungsweise mit vielen Lebensmitteln tierischen Ursprungs tendenziell das LDL-HDL-Verhältnis verschlechtert und eine Ernährungsweise mit vielen Nahrungsmitteln pflanzlichen Ursprungs (Getreide, Gemüse, Hülsenfrüchte) dieses Verhältnis verbessert (Campbell & Campbell, 2011).

Auch im internationalen Vergleich einzelner Länder lassen sich statistisch hochsignifikante Zusammenhänge zwischen der Menge an aufgenommener Nahrung tierischen Ursprungs und dem Auftreten von Herz-Kreislaufkrankungen feststellen (Campbell & Campbell, 2011). Durch eigene Laborstudien, die über viele Jahre hinweg durchgeführt worden sind, konnten Colin Campbell und seine Mitarbeiter einen deutlich positiven Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Menge an tierischem Protein und dem Auftreten von Tumoren bei Labortieren beobachten (Campbell & Campbell, 2011). Die Übertragung dieser Erkenntnisse vom Labor in die Realität und vom Tier zum Mensch wurde durch die Ergebnisse der „China Study“ vollbracht. So enthält z. B. die China Study mehr als 8.000 statistisch signifikante Korrelationen zwischen Lebensstil-, Ernährungs- und Erkrankungsvariablen. Durch die internationale Auslegung des Projektes und die Auswertung von Daten zu Erkrankungshäufigkeiten und der Ernährungsweise aus anderen Ländern konnten diese Zusammenhänge auch im internationalen Ländervergleich nachgewiesen werden (Campbell & Campbell, 2011).

Die WHO (Weltgesundheitsorganisation) geht davon aus, dass etwa 30% der Krebserkrankungen in den westlichen Ländern und 20% in den sich entwickelnden Ländern ernährungsbedingt sind (The-Cancer-Project, 2012). Studien aus England und Deutschland zufolge haben Vegetarier eine bis zu 40% weniger hohe Anfälligkeit, an Krebs zu erkranken. Insbesondere das gehäufte Auftreten von Darm-, Prostata- und Brustkrebserkrankungen wird der klassischen westlichen, fleischreichen Ernährungsweise mit viel tierischen Fetten zugeschrieben (The-Cancer-Project, 2012).

Abschließend lässt sich sagen, dass bis heute mit dem steigenden Wohlstand von Bevölkerungsschichten oder ganzen Ländern ein Wandel von Ernährungsgewohnheiten stattgefunden hat und stattfindet, der von einer stark getreide- und gemüsehaltigen Ernährung hin zu einer Ernährung mit mehr tierischen Produkten und auch mehr industriell verarbeiteten Produkten mit hohen Fettgehalten geht. Dies lässt sich zurzeit sehr gut am Fallbeispiel von China beobachten (Campbell & Campbell, 2011) (Popkin & Du, 2003). Einhergehend mit einem derartigen Ernährungswandel treten sog. Wohlstandserkrankungen (Herz-Kreislaufkrankungen, Diabetes, Adipositas, bestimmte Krebsarten) vermehrt auf. So hat z. B. der gegenwärtige Ernährungs- und Lebensstilwandel in Lateinamerika, Nordafrika, dem Mittleren Osten, und in Ost- und Südostasien zu einer Verschiebung der Krankheitshäufigkeiten von Unterernährung und Infektionen hin zu ernährungsbedingten Krankheiten (NR-NCD, engl. *nutrition related noncommunicable diseases*) geführt (Popkin, 2002, zitiert in Popkin et al., 2003). Für die urbane Bevölkerung in China lässt sich zwischen 1980 und 1999 sogar ein leichter Gesamtanstieg der Todesfälle pro 100.000 Einwohner feststellen, bei dem das Absinken von nicht-ernährungsbedingten Todesfällen durch den Anstieg der ernährungsbedingten Todesfälle (Herz-Kreislauf, Krebs, Diabetes) mehr als kompensiert wird (Du, et al., 2002). Im ruralen China haben im selben Zeitraum die nicht-ernährungsbedingten Todesfälle stark abgenommen (allgemein verbesserte Gesundheitsstandards) und trotz eines Anstiegs der ernährungsbedingten Todesfälle zu einem Absinken der Gesamttodesfälle geführt (Du, et al., 2002). Es scheint aus gesundheitlicher Sicht keine wissenschaftlich haltbare Begründung für einen hohen Konsum von Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs zu geben. Ganz im Gegenteil führt im Umkehrschluss eine getreide-, gemüse- und ballaststoffreiche Ernährung mit wenig oder gar keinen tierischen Produkten zu einer deutlichen Abnahme der sog. Wohlstandserkrankungen (Campbell & Campbell, 2011), (Du, et al., 2002), (Popkin & Du, 2003) und, wenn eine ausreichende und ausgewogene Gesamtnahrungsmittelaufnahme gewährleistet ist, zu einer Abnahme der krankheitsbedingten Gesamttodesfälle. Auch im Oktoberbericht 2012 der GEAS (Global Environmental Alert Service) wird darauf hingewiesen, dass neben den positiven ökologischen Auswirkungen eines reduzierten Fleischkonsums auch mit einem Rückgang an Herz-Kreislaufkrankungen und bestimmten Krebsarten zu rechnen wäre. In diesem Bericht wird in einem kurzen Satz resümiert: „*Healthy eating is not just important for the individual but for the planet as a whole*“ (UNEP, 2012).

9.4 Steigender Fleischkonsum als globales Problem

In den entwickelten Ländern werden deutlich mehr Nahrungsmittel tierischer Herkunft konsumiert als z. B. die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) oder unabhängige wissenschaftliche Studien empfehlen. Über die durchschnittlich 90 kg Fleisch und 160 kg Milchprodukte, die pro Kopf und Jahr in den Industrieländern konsumiert werden, findet eine Eiweißzufuhr tierischen Eiweißes von ca. 56

Gramm pro Tag und Kopf statt (Bellarby, et al., 2008). Das sind in etwa auch 56% von einer Gesamteiweißzufuhr von 100 g (FAOSTAT, 2006). In den Schwellenländern liegt die tägliche Eiweißzufuhr mit etwa 80 g pro Tag und Kopf geringer und in den Entwicklungsländern mit etwa 60g pro Tag und Kopf (mit 30% tierischem Eiweiß) am niedrigsten (FAOSTAT, 2006).

In Anbetracht der in den Abschnitten 9.2 und 9.3 dargestellten Probleme, die mit dem Tierproduktionssektor und einem hohen Konsum von tierischen Lebensmitteln in Verbindung gebracht werden, erscheint die FAO-Prognose (FAOSTAT, 2002) eines 60%-Anstiegs der globalen Fleischproduktion bis 2030 eher problematisch. Außer Frage steht natürlich, dass in vielen Entwicklungsländern noch erheblicher Verbesserungsbedarf bei der Nahrungsmittelversorgung der Bevölkerung besteht. So gibt es laut FAO-Statistik (FAOSTAT, 2006) noch insgesamt 32 Länder, in denen zwischen 29 und 72% der Bevölkerung unterernährt sind (Mittel 42%). Die tägliche Nahrungszufuhr in Ländern aus dieser Gruppe ist nach wie vor gering und liegt teilweise niedriger als noch vor 30 Jahren (Niger und Jemen mit 2000 kcal/Tag). Andererseits wurden in den letzten Jahrzehnten beachtliche Erfolge bei der Verbesserung der Nahrungsversorgung in den Entwicklungsländern erzielt (vgl. Tabelle 9.1.1) und insbesondere in Ländern mit wachsenden Volkswirtschaften und hohen Bevölkerungszahlen, wie China oder Indonesien, konnte die pro Kopf-Kalorienzufuhr erheblich verbessert werden (FAOSTAT, 2006).

Nach FAO-Statistik (FAO, 2006) leben heute schon mehr übergewichtige Menschen (1 Milliarde) auf der Erde als unterernährte (800 Millionen). Es sollte sicherlich vorrangiges Problem sein, die Zahl der unterernährten Menschen weiter zu reduzieren und die Nahrungsversorgung in den ärmsten Ländern zu verbessern, aber zuzulassen, dass ein immer größer werdender Anteil der Weltbevölkerung übergewichtig wird, ist sicherlich auch nicht unproblematisch (siehe Abschnitt 9.3).

Zurzeit in den entwickelten Ländern aufgenommene Tagesproteinmenge (pro Kopf): 100 Gramm

Hiervon pflanzlichen Ursprungs:	44 Gramm*
Hiervon tierischen Ursprungs:	56 Gramm*
Hiervon Fleisch:	25 Gramm**
Hiervon Fisch:	2 Gramm***
Hiervon Milchprodukte:	29 Gramm*

Nach DGE empfohlene Tagesmenge an Eiweiß: 0,8 Gramm pro kg Körpergewicht bzw. 9-11% der aufgenommenen Nahrungskalorien

Bei einem Körpergewicht von 70 kg:	56 Gramm
Bei einer Kalorienaufnahme von 2000 kcal (bei 4 kcal pro g Protein):	50 Gramm

Nur rein hypothetisch, und alle Probleme der globalen Verteilung von Gütern außen vor lassend, ließe sich folgende Berechnung für eine weisere globale Nährstoffverteilung durchführen, wobei das Hauptaugenmerk hierbei bei der Versorgung der Bevölkerung mit Proteinen ist (die Versorgung mit Proteinen ist in den Entwicklungsländern schlechter als die Gesamtversorgung mit Nahrungskalorien und in den entwickelten Ländern i.d.R zu hoch).

Somit liegen die entwickelten Länder bei der Eiweißaufnahme deutlich über der Empfehlung der DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung).

Auch für den Fleischkonsum liegt die Tagesmenge deutlich zu hoch. Nach DGE-Ernährungskreis (DGE, 2012) soll die wöchentliche Fleischmenge (ohne Fisch) bei 300 - 600 Gramm liegen. Das sind durchschnittlich etwa 57 Gramm pro Tag und 21 kg pro Jahr. Zurzeit werden in den entwickelten Ländern 42 kg Fleisch pro Kopf und Jahr verzehrt (entspricht etwa 90 kg Schlachtgewicht), also doppelt so viel. Auch bei der Betrachtung des Proteingehaltes kommt man auf diese Überversorgung, denn bei einem Eiweißgehalt von durchschnittlich 15 Gramm pro 100 Gramm Fleisch sollten maximal 12,8 Gramm Eiweiß aus Fleischquellen pro Tag aufgenommen werden, also etwa die Hälfte von den tatsächlich verzehrten 25 Gramm.

Für die Milchprodukte stimmen die Verzehrswerte schon deutlich besser. Die DGE empfiehlt 225 Gramm Milch oder Jogurt und 55 Gramm Käse pro Tag. Bei einem mittleren Eiweißgehalt von 5 Gramm auf 100 Gramm in Milch und 20 Gramm auf 100 Gramm Käse, kommt man auf 22,25 Gramm Eiweiß pro Tag, also (nur) 30% über der DGE-Empfehlung.

In den Entwicklungsländern aufgenommene Proteinmenge (pro Kopf, 2006):	60 Gramm****
Hiervon pflanzlichen Ursprungs:	41 Gramm*
Hiervon tierischen Ursprungs:	19 Gramm*
Hiervon Fleisch:	7 Gramm*
Hiervon Milchprodukte:	12 Gramm*

* Quelle: Bellarby, et al., 2008

** Quelle: Agrarheute, 2012 und eigene Berechnung

*** Quelle: Rimbach, et al., 2010 und eigene Berechnung

**** Quelle: FAOSTAT, 2006 und eigene Berechnung

Um in den optimalen Proteinversorgungsbereich (nach DGE) zu kommen und die Proteinzufuhr in den Ländern anzugleichen (Schwellenländer sind bei dieser vereinfachten Bilanzierung nicht berücksichtigt), müsste die Zufuhr aus tierischen Quellen in den entwickelten Ländern um etwa 19

g/Tag sinken. In den Entwicklungsländern müsste die Proteinaufnahme aus tierischen Quellen um 16 g/Tag steigen.

Bei angenommenen 2 Mrd. Menschen in den entwickelten Ländern und 4 Mrd. Menschen in den Entwicklungsländern würde so eine Verschiebung in der Proteinaufnahme eine zusätzliche globale Produktion von tierischem Eiweiß von 6,5 g/Tag / Person (gerechnet für diese 6 Mrd. Einwohner) bedeuten.

Bei einer derzeitigen Produktion von 27 g (54g *2 Mrd./4 Mrd.) in den Industrieländern und 19 g in den Entwicklungsländern (also 46 g /Tag und Kopf) bedeutet dies eine Mehrproduktion von etwa 17% (54g / 46g).

Abschließend muss zur Proteinversorgung von Bevölkerungen noch gesagt werden, dass es keine wissenschaftlichen Beweise dafür gibt, dass Proteine aus tierischen Produkten hochwertiger oder für eine gesunde Ernährung notwendig sind (Campbell & Campbell, 2011). Wie in Abschnitt 9.3 näher erläutert, ist genau das Gegenteil der Fall. Um eine ausreichende Versorgung mit Eiweiß zu gewährleisten, eignen sich verschiedene pflanzliche Nahrungsmittel (Tabelle 9.4.1). Mit pflanzlichen Nahrungsmitteln kann eine wachsende Weltbevölkerung weniger Flächenintensiv, umwelt- und ressourcenschonender und zusätzlich noch gesünder ernährt werden.

Da Ernährungsprobleme heute in erster Linie durch ein Verteilungsproblem verursacht werden, trifft dies vermutlich auch für die kommenden Jahrzehnte noch zu.

Tabelle 9.4.1 (40): Eiweiß- und Kaloriengehalte in verschiedenen pflanzlichen Nahrungsmitteln im Vergleich zu Fleisch und Milch

Nahrungsmittel	Kalorien pro 100 g (kcal)	Protein in g pro 100 g
Fleisch	250 (Mittel)	15 (Mittel)
Tofu	80	13
Milch (Kuh)	47	3,4
Sojamilch	35	3,3
Tahin (Sesammus)	551	25 g
Linsen	340	23,5
Erbsen	310	21
Kidneybohnen	300	21
Naturreis	355	8
Walnüsse	705	16
Mandeln	642	21
Seitan (Weizeneiweißprodukt)	100	25
Leinsamen	439	18
Hirse	311	11

Es wird vermutlich auch in 40 Jahren noch schlecht- und unterernährte Menschen auf der Erde geben, aber es wird auch eine deutlich höhere Anzahl an Menschen geben, die durch ein Zuviel an

Nahrung krank sein werden und dadurch die Gesundheitssysteme belasten. Aktuelle Statistiken belegen, dass in Deutschland etwa ein Drittel der Kosten durch ernährungsbedingte Krankheiten verursacht werden (Ärzteblatt, 2006).

Das entspricht einer Gesamtsumme von 70 Mrd. Euro pro Jahr - ein nicht unerheblicher volkswirtschaftlicher Schaden, der so scheint es, völlig unnötig entsteht.

Auch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) hat dies schon längst erkannt und fördert Forschungsvorhaben zum Themenkomplex „Ernährung und Krankheit“ (BMBF, 2012).

9.5 Mögliche Flächenfreisetzung in Deutschland durch reduzierten Fleischkonsum

In Deutschland werden laut Mitteilung von Agrarheute (Agrarheute, 2012) durchschnittlich 165 g Fleisch pro Person und Tag verzehrt. Das sind 79 g mehr, als die Deutsche Gesellschaft für Ernährung empfiehlt, nämlich maximal 86 g pro Tag.

Dieser Fleischverzehr setzt sich zusammen aus: 54,1% Schweinefleisch, 18,6% Geflügelfleisch, 12,4% Rindfleisch, 0,9% Schaf/ und Ziegenfleisch sowie 2,2% sonstige Fleischerzeugnisse.

Es gibt gewichtige Gründe für eine deutliche Reduzierung des Fleischkonsums hierzulande und auch in anderen Industrieländern. Hierzu zählen u. a. die unter den Abschnitten 9.2 bis 9.4 aufgeführten Gründe, doch auch im Hinblick auf die immer wieder geführte „Tank oder Teller“-Diskussion, wenn es hierzulande oder in anderen Ländern um den Ausbau der Bioenergienutzung geht, kann und muss unsere flächenintensive Produktion von tierischen Nahrungsmitteln auf den Prüfstand. In diesem Zusammenhang hat mittlerweile in Wissenschaftlerkreisen, in denen die Problematik bekannt ist, schon die Abwandlung von „Tank oder Teller“ in „Fleisch oder Teller“ Eingang in den Sprachgebrauch gefunden. Diese Umformung der Formulierung ist insofern richtig, da weltweit und auch in Deutschland erheblich mehr Fläche für die Produktion von tierischen Nahrungsmitteln verschwendet wird (Ineffizienz der Kalorienproduktion), als für die Bioenergieproduktion verwendet wird. Wie bereits in Abschnitt 9.2.1 erläutert, wird in Deutschland 60% der Getreideernte an Tiere verfüttert. Bei einer Flächeninanspruchnahme von 6,6 Mio. ha (Getreideanbaufläche 2010) sind das fast 4 Mio. ha Ackerland. Hinzu kommen noch mal 2,5 Mio. ha Ackerland, die für die Grünfütterproduktion verwendet werden (vgl. 9.2.1). Insgesamt nimmt die Produktion von Tierfutter also etwa 9 Mio. ha d.h. 75% der Gesamtackerfläche in Deutschland in Anspruch.

Angenommen, die deutsche Bevölkerung würde den Empfehlungen der DGE folgen und 50% weniger Fleisch essen, so könnten (grob gerechnet) 50% weniger Futtermittel für die Tiermast angebaut werden. Bei einer Flächeninanspruchnahme von 9 Mio. ha für die Futtermittelproduktion sind das 4,5 Mio. ha. Wenn der durchschnittliche Deutsche 50% weniger Fleisch aße, müsste er theoretisch 27g Protein pro Tag über andere Quellen zu sich nehmen (was nicht unbedingt notwendig wäre, wie oben beschrieben). Als alternative Proteinquellen könnten z. B. Erbsen, Linsen und Seitan (aus

Weizeneiweiß) in Frage kommen. Um nun diese Substitution verrechnen zu können, wird der Eiweißgehalt der vier Nahrungsmittel miteinander verrechnet.

Durch den reduzierten Fleischkonsum würde eine landesweite „Proteinlücke“ von $27\text{g} \times 81\text{ Mio.} \times 365\text{ Tagen}$, also $7,983 \times 10^{11}$ Gramm pro Jahr entstehen.

Würde man die freigewordenen 4,5 Mio. ha zu gleichen Teilen mit Weizen, Linsen und Erbsen bestellen, so erhielte man über die folgende Berechnung einen Proteinertrag von $15,6 \times 10^{11}$ Gramm pro Jahr (Berechnung siehe Seite 131).

Linsenertrag: 1 t/ha ; Linsenproteingehalt: 235.000 g/ha

Erbsenertrag: 1,5 t/ha ; Erbsenproteinertrag: 315.000 g/ha

Weizenertrag: 7,0 t/ha ; Weizenproteinertrag (in Seitan): $25\text{g} \times 0,4 \times 0,7 = 7\text{g}/100\text{g} = 490.000\text{ g/ha}$

Faktor 0,4 = Verhältnis Seitan zu Weizenmehl

Faktor 0,7 = Verhältnis Weizenmehl zu Weizenkorn

Bei jeweils 1,5 Mio. ha Anbaufläche pro Kultur ergeben sich nun Proteinerträge von:

- $3,525 \times 10^{11}$ Gramm und Jahr für Linsen
- $4,725 \times 10^{11}$ Gramm und Jahr für Erbsen
- $7,35 \times 10^{11}$ Gramm und Jahr für Seitan (Weizen)

Da die „Proteinlücke“ aber nur $7,983 \times 10^{11}$ Gramm pro Jahr beträgt, können $1 - \left(\frac{7,983 \times 10^{11}}{15,6 \times 10^{11}} \right)$, also 48,8 % der 4,5 Mio. ha für andere Zwecke verwendet werden.

In Bezug auf die Nahrungskalorien würde sich diese Umstellung wenig bemerkbar machen, obwohl die drei pflanzlichen Produkte nur 64,6% der Kalorienmenge von Fleisch (jeweils pro Gramm Eiweiß) enthalten.

25 Gramm Eiweiß entsprechen etwa einer Energiemenge von 100 kcal, was bei einer mittleren Tageskalorienmenge von 2.500 kcal vier Prozent ausmacht. Die 64,4% werden also mit 0,04 multipliziert und es ergibt sich lediglich eine verminderte Energiezufuhr von 2,6%. Da aber über das Fleisch auch oft viel gesättigte Fettsäuren und Cholesterin aufgenommen werden (pflanzliche Lebensmittel enthalten kein Cholesterin), wären die volksgesundheitlichen Gewinne einer solchen Ernährungsumstellung vermutlich hoch.

Ein weiterer positiver Effekt dieser Umstellung wäre die Reduktion der Maisanbaufläche, denn etwa 1,8 Mio. ha Silomais werden nur für die Tierfütterung angebaut. Beim Energiemais sind es weniger als 0,8 Mio. ha (Stand 2011). Dies würde vermutlich zu einer Akzeptanzverbesserung für Biogasanlagen beitragen.

Weiterhin müssten auch ca. 50% weniger Sojamehl und andere Futtermittelzutaten aus Regenwaldrodungsgebieten importiert werden. Nach Witzke et al. (2011) sind das auch noch einmal 3,5 Mio. ha (in Übersee), und Nährstoffüberschüsse könnten leichter vermieden werden.

Insgesamt betrachtet scheinen die ökologischen und volksgesundheitlichen positiven Effekte, die mit einem verminderten Fleischkonsum einhergehen würden (z. B. schrittweiser Angleich auf die Empfehlungsmengen der DGE), eher groß. Auf den frei werdenden Flächen könnten z. B. der Ökolandbau, aber auch die Bioenergienutzung ausgebaut werden. Zusammenfassend ist in diesem Zusammenhang festzuhalten, dass Tierhaltung und die Nutzung von tierischen Lebensmittel eine wichtige Säule des globalen Agrarsektors darstellt (siehe oben) und auch in Zukunft ihren Beitrag zur Welternährung leisten muss. Als kritisch einzustufen sind allerdings einerseits die bereits hohen Konsummengen von tierischen Nahrungsmitteln in den Wohlstandsgesellschaften und andererseits die starke Zunahme dieses Konsums in den sich entwickelnden Ländern und Gesellschaften. Die Tierhaltung und die starke Nachfrage nach tierischen Lebensmittel verursachen bereits heute vielfältige Zielkonflikte (Ernährungssicherung, THG-Emissionsminderung, Ressourcenschutz, Bekämpfung und Behandlung von ernährungsbedingten Erkrankungen), die durch den prognostizierten Anstieg in diesen Bereichen (FAOSTAT, 2006) vermutlich noch weiter verschärft werden. Einen Beitrag zur Entschärfung dieser Problematiken könnte über eine gezielt gesteuerte Reduktion des Fleischkonsums in den entwickelten Ländern erfolgen. Dies könnte z. B. über eine verstärkte Aufklärung der Öffentlichkeit über die oben beschriebenen ökologischen und gesundheitlichen Risiken eines hohen Fleischkonsums geschehen. Ein weiterer Aspekt ist vermutlich auch die „Dumpingpreiskultur“, die mit Lebensmittel tierischen Ursprungs und Lebensmittel allgemein einhergeht. Fleischprodukte sind heute günstiger denn je und für alle Bevölkerungsschichten täglich erschwinglich. Es muss vermutlich hinterfragt werden (wie man dies ja auch bei Energieträgern wie dem Öl bereits tut), ob die Preise für Fleisch- und Milchprodukte, die der Verbraucher im Supermarkt zahlt, die wahren Kosten (z. B. inklusive THG-Emissionen, ökologische Folgeschäden, Kosten für das Gesundheitswesen) des Produktes widerspiegeln? Die Antwort wäre vermutlich ein Nein.

Möglicherweise muss auch hinterfragt werden, ob der Staat es zulassen sollte, dass Menschen sich entgegen den Empfehlungen von extra hierfür geschaffenen Einrichtungen (z. B. DGE) „krank-essen“ und ob der volkswirtschaftliche Schaden hierfür zu verantworten ist. Tabak- und Alkoholkonsum gelten ab bestimmten Konsummengen nachgewiesenerweise als gesundheitsschädlich. Um den Konsum von Alkohol und Tabak zu lenken, existieren in vermutlich fast allen Ländern mehr oder weniger hohe Besteuerungen auf diese Produkte. Muss der übermäßige Konsum von Fleisch möglicherweise durch eine Fleischsteuer reguliert werden? Ein besserer Lösungsansatz wäre vermutlich eine anders gestaltete Preis- und Förderpolitik im Agrarbereich, die weniger auf Billig- und Massenproduktion ausgerichtet ist. In der Umsetzung sähe es dann so aus, dass Tierprodukte, ähnlich wie es in der ökologischen Landwirtschaft schon heute üblich ist, ökologisch verträglicher,

ethisch vertretbarer (im Hinblick auf die zunehmende Kritik an der Massentierhaltung), aber eben auch kostenintensiver produziert werden.

Der WWF-Deutschland (Wietzke, et al., 2011) hat in diesem Zusammenhang eine Vision entwickelt, in der Forderungen für eine ethisch und ökologisch vertretbarere Landwirtschaft an den Reformprozess der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) herangetragen werden. Hierzu zählen z. B. die Reduktion von Beihilfen für Großmastbetriebe, die Extensivierung der Tierhaltung sowie die vermehrte Koppelung von Investitionsbeihilfezahlungen und Prämien an Umwelt- und Naturschutzauflagen.

Die höheren Kosten muss der Verbraucher natürlich mittragen (wie dies ja z. B. bei Bioprodukten ja voluntär auch schon geschieht), entweder indem er sein Konsumverhalten im Bezug auf Fleisch beibehält und an anderer Stelle versucht Geld einzusparen, oder indem er den Expertenempfehlungen folgt und seinen Fleischkonsum reduziert. Noch im Jahr 1850 aß man in Deutschland z. B. noch etwa 20 kg Hülsenfrüchte (Eiweißquelle) im Jahr. In den 1960er Jahren war der Verbrauch dann schon auf 2 kg gesunken und liegt heute bei lediglich 0,5 kg (Witzke, et al., 2011). Auch wenn 1850 wahrscheinlich viele Menschen in Deutschland schlecht ernährt waren, so könnte man im heutigen Deutschland mit einem „Lebensmitteltausch“ 20 kg Fleisch gegen 20 kg Erbsen und Linsen in der Durchschnittsernährung sicherlich volksgesundheitliche und ökologisch positive Effekte erzielen.

Für die sich entwickelnden Länder ist es durchaus nachvollziehbar, dass vermehrter Wohlstand in der Bevölkerung sich auch in veränderten Ernährungsgewohnheiten niederschlägt, und dass der Zugang zu teureren, industriell verarbeiteten und allgemein als Wohlstandsnahrung eingestuftem Lebensmitteln auch von denen, die es sich leisten können, wahrgenommen wird. Es scheint in diesem Zusammenhang wichtig, dass die Bevölkerungen in den sich entwickelnden Ländern schon im Anfangsstadium des Ernährungswandels über die Risiken einer solchen Ernährungsumstellung informiert werden sollten. Organisationen wie die Weltgesundheitsorganisation (WHO) und die FAO (Food and Agricultural Organisation) haben sich jahrzehntelang mit dem Problem der Ernährungssicherung und der Mangelernährung beschäftigt. In den kommenden Jahrzehnten muss das Problem der Überernährung über diese Organisationen vermutlich vermehrt angegangen werden. Dass in diese Richtung bereits gehandelt wird, zeigt sich z. B. in Webseiteneinträgen der WHO zum Thema Ernährung, Bewegung und Volksgesundheit (WHO, 2012). Ob die sich entwickelnden Volkswirtschaften aus den Ernährungsfehlern der Industrienationen lernen werden, bleibt abzuwarten.

10. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Fragestellung nachgegangen, wie Agrar-Biomassepotenziale ermittelt werden können und welche mathematischen Modellierungsansätze und Modelle existieren, um diese Potenziale in Abhängigkeit von der Ausstattung eines Raumes (Klima, Boden) berechnen zu können. Aufgrund der Vielzahl von Modellen konnte im Rahmen dieser Arbeit selbstverständlich nur ein Überblick gegeben werden.

Es wurde ein neu entwickeltes Pflanzenmodell, das Modell BioSTAR, mit seinen Funktionen und Rechenabläufen vorgestellt. Das Modell BioSTAR ist ein kohlenstoffbasiertes Pflanzenmodell (Azam-Ali, et al., 1994), das als Software-Tool in der Java-Programmierungsumgebung „Eclipse“ entwickelt worden ist. Mit dem Modell lassen sich die Ertragspotenziale diverser Winterungen und Sommerungen für beliebige Ackerstandorte in Abhängigkeit von Boden- und Klimafaktoren berechnen. Über eine Datenbankschnittstelle werden die Standortdateien (Boden, Klima) in das Modell eingelesen und über drei Hauptprozesse, der Kohlenstoffassimilation und -dissimilation, der Entwicklungssteuerung (Phänologie, BFI, Wurzel, Ertrag) sowie der Wasserbilanzierung (Evapotranspiration und Bilanzierung im Bodenspeicher) verarbeitet. Als Endprodukt schreibt das Modell die Ertragsparameter Biomasse (Gesamt und Wurzel) sowie den Wasserverbrauch in die Ergebnisdatenbank. Eine Modellierung von Stickstoffflüssen (Mineralisierungsraten, Verbrauch durch die Pflanzen) ist im Modell angelegt, bedarf aber noch einer Weiterentwicklung.

Das Modell ist prinzipiell für die Modellierung von diversen Ackerkulturen ausgelegt, es sind zum jetzigen Zeitpunkt (08/2012) aber nur einige Wintergetreide und die Sommerungen Mais, Sorghum und Silomais kalibriert und verifiziert.

Für die genauere Ermittlung von Ertragspotenzialen auf niedersächsischen Agrarflächen (Forschungsraum des BIS-Projektes) wurde nun das im ersten Teil der Arbeit vorgestellte Modell BioSTAR anhand von in Feldversuchen gemessenen Ertragsdaten der niedersächsischen Landwirtschaftskammer (LWK, 2010) für die Kulturen Wintergerste, Winterweizen, Wintertriticale, Winterroggen, Silomais, Sorghum und Sonnenblume kalibriert und validiert. Für alle sieben Kulturen zeigt das Modell eine hinreichend genaue Prognose der realen Ertragsdaten. Der Modellfehler liegt in den meisten Fällen zwischen 5 und 10%.

Um zu testen, ob das Modell BioSTAR auch außerhalb des für dessen Kalibrierung verwendeten Klimabereichs noch realistische Ertrags- und Wasserverbrauchshöhen generiert, wurden in einem weiteren Arbeitsschritt Klimadatensätze von Klimastationen aus unterschiedlichen Klimazonen für die Modellierung von Maiserträgen herangezogen. Dieselben Datensätze wurden zum Vergleich zusätzlich mit dem Pflanzenmodell AquaCrop verarbeitet. Kriterien für die Auswahl der Stationen waren in erster Linie das Temperatur- und das Niederschlagsregime der Stationen.

Obwohl (anders als bei den Daten der LWK) aufgrund fehlender realer Ertragsdaten keine Validierung der Modellergebnisse möglich war, kann angenommen werden, dass die von beiden Modellen generierten Erträge und Verdunstungshöhen in realistischen Bereichen liegen. Diese weichen jedoch innerhalb der beiden Modelle z. T. beträchtlich voneinander ab. Bei der Berechnung des Wasserverbrauchs (ETa) liegen beide Modelle mit ihren Ergebnissen sehr eng beieinander und geben den Verlauf von zunehmender Evapotranspiration von humidem (Lagos, Nigeria) zu aridem Klima (Tessalit, Mali) sehr gut wieder. Da beide Modelle mit verschiedenen Anreicherungsverfahren für die Biomasse arbeiten (kohlenstoff- vs. verdunstungsbasiert), kommt es bei der Umsetzung des Verhältnisses von Verdunstungswasser zu Biomassebildung scheinbar zu zum Teil stark divergierenden Ertragsergebnissen.

Das Modell BioSTAR wird anschließend herangezogen, um die Biomassepotenziale der Kulturen Mais, Wintertriticale, Sonnenblume und Sorghum für die niedersächsischen Landkreise Goslar, Hannover und Wolfenbüttel zu bestimmen. Bei dieser Berechnung wird von einem Flächenanteil der Energie-Biomasseproduktion von 20% aller Ackerflächen und von Kulturanteilen von 60% Mais, 20% Triticale und jeweils 10% Sonnenblume und Sorghum ausgegangen. Als Datenbasis für diese Berechnung dienen die Klimadaten (langjährige Mittelwerte) aus dem NIBIS[®] sowie die NFKWE-Werte der BÜK50 und die Zustandsstufen des Ackerschätzungsrahmens. Die Berechnungsebene entspricht der Maßstabebene 1:5000 (Bodenschätzung).

Den Modellierungsteil abschließend, wird dann über eine statistische Umrechnung ein Gesamtenergiepotenzial für Niedersachsen ermittelt und mit Literaturwerten verglichen. Mit etwa 13 TWh p.a. liegt dieser bottom-up-Ansatz im Mittelbereich von zwei voneinander abweichenden Potenzialstudien.

Da das Modell für den Einsatz als Biomasseprognosemodell entwickelt worden ist, und im Rahmen des Forschungsvorhabens „Bioenergie im Spannungsfeld“ (BIS, 2012) insbesondere als Prognosewerkzeug für Energie-Biomassepotenziale eingesetzt wird, wird im Rahmen dieser Arbeit näher auf den Bereich Landwirtschaft im allgemeinen und den spezielleren Bereich des Biomasseanbaus für die Energiegewinnung eingegangen. Hierfür wird anhand von Statistikdaten ein Überblick über den gegenwärtigen Ausbaustand der niedersächsischen, der deutschen sowie der globalen Landwirtschaft gegeben. Des Weiteren werden für alle drei Maßstabsebenen Statistikdaten zu den aus der Literatur vorliegenden Energie-Biomassepotenzialen vorgestellt, verschiedene Potenzialanalysen und Nutzungspfade miteinander verglichen sowie eigene Potenzialberechnungen auf der Basis von Ertragsdaten durchgeführt.

Im letzten Kapitel der Arbeit wird der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen eine hohe Nachfrage nach Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs auf den Flächenbedarf der Landwirtschaft, den ökologischen Fußabdruck einer Ernährungsweise sowie auf die Volksgesundheit haben. Am

Beispiel von Deutschland wird gezeigt, dass eine Reduktion des Fleischkonsums auf die von den Ernährungsexperten der DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung) empfohlenen 300 – 600 Gramm pro Woche und eine Substitution dieser Fleischmenge durch eiweißreiche pflanzliche Nahrungsmittel eine Flächenfreisetzung von etwa 2,5 Mio. ha Ackerfläche bewirken würde. Da sich die Bioenergienutzung immer wieder mit dem Vorwurf auseinandersetzen muss, mit der Nahrungsmittelproduktion in Konkurrenz zu stehen und den Welthunger zu verschärfen, sollte im Hinblick auf die hohe Flächenintensität bei der Produktion von tierischen Nahrungsmitteln erneut über diesen Vorwurf nachgedacht werden.

Für die Erfassung von Biomassepotenzialen für die Energiegewinnung hat sich gezeigt, dass Pflanzenmodelle nützliche Werkzeuge sind, um standortbezogene agrarische Biomassepotenziale zu ermitteln. Je nach Datenverfügbarkeit und Rechnerkapazitäten können solche, hochaufgelösten Potenzialbestimmungen auch für größere Gebiete (Kreise, Bundesländer) herangezogen werden.

In dieser Arbeit wurde das neue Modell BioSTAR hinsichtlich seiner Prognosegenauigkeit für Biomassepotenziale für verschiedene Ackerkulturen kalibriert, validiert und in drei niedersächsischen Landkreisen sowie mit Stationsdaten aus unterschiedlichen klimatischen Räumen getestet. Um den Anwendungsbereich des Modells zu erweitern, ist es erforderlich, Parameter für weitere Ackerkulturen, wie z. B. Raps, Zuckerrüben, die Durchwachsene Silphie sowie schnellwachsende Baumarten in das Modell zu implementieren und diese zu testen.

Weiterer Entwicklungs- bzw. Verbesserungsbedarf im Modell besteht u.a. bei der Simulation von Wasserstress in Abhängigkeit von der Phänologie sowie dem Temperatureinfluss auf die Pflanzenentwicklung und die Fotosynthese.

Zusätzlich sollte die in Kapitel fünf begonnene Sensitivitätsanalyse mit real gemessenen Ertragsdaten aus den Bereichen dieser Klimastationen validiert werden, um so eventuelle Schwachstellen des Modells sichtbar zu machen. Auch weitere vergleichende Modellläufe mit anderen Modellen, wie z. B. dem Modell AquaCrop (Steduto, et al., 2009) oder dem Modell CropSyst (Stöckle, et al., 2003), stellen eine Möglichkeit dar, um Modellschwachstellen aufzuspüren und zu beheben.

11. Literaturverzeichnis

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe-Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage*. Hannover

AEE (2012a). *Agentur für Erneuerbare Energien*. [Online] Available at: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/AEE_Biogasanlagen_in_Deutschland_1992-2011_nov11_01.jpg

[Zugriff am 13 Februar 2012].

AEE (2012b). *Unendlich-Viel-Energie*. [Online] Available at: <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/bioenergie/detailansicht/article/105/potenziale-der-bioenergie.html>

[Zugriff am 09 07 2012].

Agrarheute (2012). *agrarheute*. [Online]

Available at: <http://www.agrarheute.com/ami-fleischkonsum070510>

[Zugriff am 02 08 2012].

Albrizio, R. & Steduto, P. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. *Agricultural and Forest meteorology*, Issue 130: 254-268.

Allen, R. & L.S. Pereira, D. M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Papers*. Rome

Amaducci, S. , Zatta, Raffanini, M. , Venturi, G. (2012). Characterisation of Hemp (*Cannabis sativa* L.) roots under different growing conditions. *Plant and Soil*, Issue 313: 227-235.

Amos, B. & Walters, D. T. (2006). Maize Root Biomass and Net Rhizodeposited Carbon: An Analysis of the Literature. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 70:1489–1503.

Amthor, J. (1984). The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant, Cell and Environment* , Issue 7, 561-569.

Amthor, J. (1989). *Respiration and Crop Productivity*. s.l.:Springer.

Amthor, J. (1994). Higher plant respiration and its relationships to photosynthesis. In: *Ecophysiology of Photosynthesis* , Seiten 71–101. Berlin.

Amthor, J. S. (1989). *Respiration and Crop Productivity*. New York, Berlin, Heidelberg.

Ärzteblatt (2006). *aerzteblatt.de*. [Online]

Available at: <http://www.aerzteblatt.de/nachrichten/23184/>

[Zugriff am 01 08 2012].

Azam-Ali, S., Crout, N.M.J. & Bradley, R.G. (1994). *Perspectives in modelling resource capture by crops*. Nottingham University Press, UK.

Batjes, N. , Dijkshoorn, K. , v. Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., Shi, X. (2008). *Harmonized World Soil Database (version 1.0)*, Rome, Laxenburg

Battaglia, M., Beadle, C., Loughhead, S. (1996). Photosynthetic temperature responses of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Tree Physiology*, Issue 16, 81--89.

Bellarby, J., Foereid, B., Hastings, A. & Smith, P. (2008). *Cool Farming: Climate Impacts of Agriculture and Mitigation Potential*, Amsterdam: Greenpeace International.

Bengoa, J. M. (2001). Food transitions in the 20th±21st century. *Public Health Nutrition*, December, Vol. 4 (6A), pp. 1425-1427.

Berry, J. & Björkman, O. (1980). Photosynthetic response and adaption to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, Issue 31:491-543.

Biogasforum (2007). *Stand und Perspektiven der Biogasnutzung in Niedersachsen*. Hannover.

Birch, C. , Hammer, G. L., Rickert, K.G. (1998). Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Australian Journal of Agricultural Research*, Issue 49: 249-62.

BIS (2012). *Bioenergie Uni Göttingen*. [Online]

Available at: <http://www.bioenergie.uni-goettingen.de/index.php?id=107>

[Zugriff am 01 03 2012].

BMBF (2012). *BMBF*. [Online]

Available at: <http://www.bmbf.de/de/1033.php>

[Zugriff am 01 08 2012].

BMU (2011). *BMU*. [Online]

Available at: http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/47718.php

[Zugriff am 14 Februar 2012].

BMU-BMELV (2009). *Nationaler Biomasseaktionsplan - Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung*. [Online]

Available at:

http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_biomasseaktionsplan_anhang.pdf[Zugriff am 16 Februar 2012].

BMVBS (2010). *Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung. BMVBS-Online Publikationen 27/2010*, Ministerium für Verkehr (BRD).

BMW-BMU (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin: Ministerien für Wirtschaft und Umwelt (BRD).

Böhner, J. (2004). Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparameter für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLFb) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Arbeitshefte Boden*, Issue Heft 4.

Boote, K. , Jones, J. (1987). Equations to define canopy photosynthesis from quantum efficiency, max. leaf rate, light extinction, LAI, and photon flux density. *Progress in Photosynthesis Research*, Issue Volume 4.

Boote, K. & Loomis, R. (1991). The prediction of canopy assimilation. In: *Modeling Photosynthesis - from Biochemistry to Canopy*. s.l.:CSSA Special Publication no. 19.

BÖR (2012). *Nachhaltige Nutzung von Bioenergie*. Berlin: Forschungs- und Technologierat Bioökonomie (BÖR) (Hrsg.).

Böttcher, J. (2008). *Abschlussbericht: Neu internetgestützte Wege zur Optimierung der N-Düngeberatung. Teilprojekt des Institutes für Bodenkunde der Universität Hannover, AZ 22539*. Universität Hannover, Institut für Bodenkunde: s.n.

Bouman, B., v.Keulen, H., v.Laar, H., Rabbinge, R. (1996). The "School of de Wit" crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, Vol.1 52(Nos. 2/3 pp. 171-198).

Boyer, J. (1970a). Differing Sensitivity of Photosynthesis to Low Leaf Water potentials in Corn and Soybean. *Plant Physiology*, Issue 46: 236-239.

Boyer, J. (1970b). Leaf Enlargement and Metabolic Rates in Corn, Soybean, and Sunflower at Various Leaf Water Potentials. *Plant Physiology*, Issue 46: 233-235.

BPB (2012). *Bundeszentrale für politische Bildung*. [Online]

Available at: <http://www.bpb.de/wissen/QDNZZC,0,0,Prim%E4renergieversorgung.html>

[Zugriff am 29.02.2012].

BRD (2008). *Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz - BodSchätzG)*

Bundestag (2011). *13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes*. Bonn: Bundesregierung.

Burkart, S., Manderscheid, R., Wittich, K.-P., Löpmeier, F.J., Weigels, H.-J. (2011). Elevated CO₂ effects on canopy and soil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air. *Plant Biology*, Issue 13: 258–269.

Cabelguenne, M., Debaeke, P., Bouniols, A. (1999). EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat. *Agricultural Systems*, Volume 60(Issue 3: 175-196).

Campbell, T. & Campbell, T. M. (2011). *China Study - die wissenschaftliche Begründung für eine vegane Ernährungsweise - 2. Auflage*. Bad Kötzing und München: Verlag Systemische Medizin.

Chapman, S. C., Hammer, G.L., Palta, J.A. (1993). Predicting leaf area development for sunflower. *Field Crops Research*, Issue 34: 101-112.

Choudhury, B. (1985). An Empirical Model for Stomatal Resistance of Field Grown Wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 36: 65-82.

Clifton-Brown, J.C., Neilson, B., Lewandowski, I., Jones, M.B. (2000). The modelled productivity of *Miscanthus x giganteus* (GREEF et DEU) in Ireland. *Industrial Crops and Products*, Issue 12: 97-109.

de Wit, C. (1958). Transpiration and Crop Yields. In: Wageningen, The Netherlands: Versl. Landbouwk. Onderz. 64.6, IBS, Institute of Biology and Chemistry Research on Field Crops and Herbage.

de Wit, C. (1965). Photosynthesis of Leaf Canopies. *Agricultural Research Reports 663, Pudoc, Wageningen.*

de Wit, C., Brouwer, R. , Penning de Vries, F. W. D. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In: *Prediction and measurement of photosynthetic productivity.* Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

de Wit, M. , Faaij, A. I. (2008). *Biomass Resources Potential and Related Costs - Assesment of the EU-27, Switzerland, Norway and Ukraine,* Utrecht: Copernicus Institute Utrecht University.

DGE (2012). *DGE.* [Online]

Available at: <http://www.dge.de/modules.php?name=News&file=article&sid=415>

[Zugriff am 13 07 2012].

DIN-Norm-4220 (2008). *Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen).* ... s.l.:s.n.

DPA (2012). *RWE-Chef kritisiert Solarförderung als Geldverschwendung.* [Online]

Available at: http://wirtschaft.t-online.de/rwe-chef-kritisiert-solarfoerderung-als-geldverschwendung/id_53238792/index

[Zugriff am 11 08 2012].

Du, S., Lu, B. , Zhay, F., Popkin, B.M.(2002). A new stage of nutrition transition in China. *Public health Nutrition,* Issue 5(1A): 169-174.

DWD-Zitat (2012) [Online] Available at:

http://www.dwd.de/sid_rJyITdLLzbtffB2WbSZhdm47xpzrTLbF5WWyLsqzyQrNfQRnhRQM!186131909!1310184242!1318937899952/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_phaenologie&T94009gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2F[Zugriff am 18 Oktober 2011].

Easterling, W.E., Rosenberg, N.J. , McKenny, M.S., Jones, C.A., Dyke, P.T. , Williams, J.R. (1992).

Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology, Special Issue: Methodology for Assessing Regional Agricultural Consequences of Climate Change,* 59(1-2): 17-34).

Ecobas (2012). *web-based information service for modelling and simulation in ecology and environmental sciences.* [Online]

Available at: <http://ecobas.org/www-server/rem/models.html>

[Zugriff am 21 08 2012].

Ehleringer, J.R. & Björkman, O. (1977). Quantum Yields for CO₂ uptake in C-3 and C-4 plants. *Plant. Plant Physiology,* Issue 59: 86 - 90.

- Ehleringer, J.R. & Pearcy, R. (1983).** Variations in Quantum Yield for CO₂ uptake among c-3 and C4 plants. *Plant Physiology*, Issue 73: 555-559.
- Ehleringer, J. R. , Sage, R.F. , Flanagan, L.B., Pearcy, R.W. (1991).** Climate Change and the Evolution of C4 Photosynthesis. *Trends in Ecology & Evolution*, Issue Volume 6, Issue 3, Pages 71-105.
- Ehlers, W. (1996).** *Wasser in Boden und Pflanze - Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag.* Stuttgart
- Eickhout, B., Bouwman, A. F. & v. Zeijts, H (2006).** The role of nitrogen in the world food production and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Issue 116: 4-14.
- Elings, A. (2000).** Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agronomy Journal*, Issue 92: 436-444.
- Eurostat (2010).** *Eurostat.* [Online]
Available at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Agricultural_products
[Zugriff am 10 07 2012].
- EWI, Prognos, GWS (2010).** *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*, Basel, Köln, Osnabrück.
- FAO (2006).** *Livestocks Long Shadow.* Rom
- FAO (2010).** *fao.org.* [Online]
Available at: http://www.fao.org/docrep/015/am081m/am081m00.htm#Contents_en
[Zugriff am 11 April 2012].
- FAOSTAT (2002).** *World Agriculture - towards 2015/2030*, Rom: FAO.
- FAOSTAT (2006)** *World Agriculture: towards 2030/2050 Interim Report*, Rom: FAO.
- Feifel, S., Walk, W., Wursthorn, S. & Schebek, L. (2009).** *Ökobilanzierung 2009 Ansätze und Weiterentwicklung zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit: Bewertung des Wasserverbrauchs in der Ökoeffizienz-Analyse der BASF, s.l.: KIT Scientific Publishing.*
- Flenet, F. , Kiniry, J.R., Board, J.E., Westgate, M.E., Reicosky, D.C. (1996).** Row spacing Effects on Light Extinction Coefficients of Corn, Sorghum, Soybean, and Sunflower. *Agronomy Journal*, Issue 88: 185-190.
- FNR (2012).** *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.* [Online]
Available at: <http://mediathek.fnr.de/catalog/product/view/id/3/s/anbaufache-fur-nachwachsende-rohstoffe-2011/category/3/>
[Zugriff am 14 Februar 2012].
- FNR (2012).** Daten und Fakten BtL, *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.* [Online]
Available at:
http://www.fnrserver.de/cms35/fileadmin/fnr/images/aktuelles/medien/BtL/BtL_Daten_Fakten.pdf
[Zugriff am 01 03 2012].

FNR (2011). *Basisdaten Bioenergie*. Gülzow

Focus-Online (2012). *Kosten der Energiewende - Verbraucherschützer fürchten steigende Strompreise*. [Online]

Available at: http://www.focus.de/immobilien/energiesparen/kosten-der-energiewende-verbraucherzentralen-befuerchten-weiter-steigende-strompreise_aid_760234.html

[Zugriff am 11.08.2012].

Fuentes, J. & King, K. (1989). Leaf photosynthesis and leaf conductance of maize grown hydroponically and in soil under field conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 45: 155-166.

Gallagher, J. & Biscoe, P. (1978). Radiation absorption, growth, and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science*, Issue 91: 47-60.

Gardener, F.P., Pearce, R.B., Mitchell, R.L. (1985). *Plant Physiology*. Ames, Iowa

Gardener, W. (1960). Dynamic Aspects of Water Availability to Plants. *Soil Science*, Issue Vol. 89, Number 2 pp. 63-73.

Gäth, S., Meuser, H., Abitz, C.A., Wessolek, G., Renger, M. (1989). Determination of Potassium Delivery to the Roots of Cereal Plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Issue 152: 143-149.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Issue Vol. 44: 892-898.

Gillet, A.G., Crout, N.M.J., Stokes, D.T., Sylvester-Bradley, R., Scott, R.K. (1999). Simple winter wheat green area index model under UK conditions. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, Issue 132: 263-271.

Glugla, G., Jankiewicz, P., Rachimow, C., Lojek, K., Richter, K., Fürtig, G., Krahe, P. (2003). *BAGLUVA Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses*, Koblenz: s.n.

Grossman-Clarke, S., Kimball, B.A., Hunsaker, D.J., Long, S.P., Garcia, R.L., Kartschall, Th., Wal, G.W., P.J. Printer, Wechsung, F., LaMorte, R.L. (1999). Effects of elevated atmospheric CO₂ on canopy transpiration in senescent spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 93: 95-109.

Gurrath, P. (2011). *Landwirtschaft auf einen Blick*. Wiesbaden

Han, H., Li, Z., Ning, T., Zhang, X., Shan, Y., Bai, M. (2008). Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. *Plant Soil Environment*, Issue 54, (7): 313-319.

Heumann, S., Böttcher, J. (2004). Temperature functions of the rate coefficients of N mineralization in sandy arable soils. Part I. Derivation from laboratory incubations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Issue 167, 381-389.

Hikosaka, H. (1997). Modelling Optimal Temperature Acclimation of Photosynthetic Apparatus in C3-Plants with respect to Nitrogen Use. *Annals of Botany*, Issue 80: 721-730.

Hillel, D. (1980). *Application of Soil Physics*. New York: Academic Press.

Hoffmann, F. (1995). Fagus, a model for growth and development of beech.. *Ecological Modelling*, Issue 83 (3), 327-348.

Horrigan, L., Lawrence, R. , Walker, P. (2002). How Sustainable Agriculture Can Address the Environmental and Human Health Harms of Industrial Agriculture. *Environmental Health Perspectives*, Volume 110(5: 445-455).

Hossain, M. , Osaki, M., Haque, M.S., Kahn, M.M.H., Rahmatullah, N.M., Rashid, M.H. (2008). Effect of Straw Management and Nitrogen Fertilization on Root Growth and Root Characteristics of Wheat through Raised Bed System on a Low N Calcareous Soil of Bangladesh. *Thai Journal of Agricultural Science*, Issue 41(1-2): 45-52.

Hsiao, T. & Acevedo, E. (1974). Plant Responses to Water Deficits, Water-Use-Efficiency, and Drought Resistance. *Agricultural Meteorology*, Issue 14: 59-84.

IEA (2007). *Renewables in Global Energy Supply - an IEA Fact Sheet*. Paris, France: International Energy Agency.

Irvine, J. , Perks, M.J., Magnani, F., Grace, J. (1998). The response of pinus sylvestris to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance. *Tree Physiology*, Issue 18: 393-402.

Jacobs, C.J.M., van den Hurk, B.M.M., de Bruin, H.A.R. (1996). Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 80: 111-134.

Jame, Y. & Cutforth, H. (1996). Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(1: 9-19).

Johnson, L. (1990). Plant respiration in relation to growth, maintenance, ion uptake and nitrogen assimilation. *Plant, Cell and Environment*, Issue 13, 319-328.

Jonckheere, I. Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 121: 19-35.

Jones, C., Dyke, P. T., Williams, J. R., Kiniry, J. R., Benson, V. W., Griggs, R. H. (1991). EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*, Volume 37,(Issue 4, Pages 341–350).

Jones, H. G. (2007). Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, Issue Vol. 58 No. 2 pp. 119-130.

Jones, J. W. , Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* , Issue 18: 235-265.

Jones, J., Keating, B. & Portera, C. (2001). Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, Volume 70(Issues 2–3, Pages 421–443).

Kahle, P., Beuch, S., Boelcke, B., Leineweber, P., Schulten, H.R. (2001). Cropping of Miscanthus in central Europe: Biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. *European Journal of Agronomy*, Issue 15: 171-184.

Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (2009). *Energie aus Biomasse*. Berlin, Heidelberg

Karpenstein, M., von Buttlar, C. (2012). Auswirkungen des Klimawandels auf die Phänologie der landwirtschaftlichen Kulturen in Niedersachsen – Möglichkeiten der Anpassung am Beispiel des Energiepflanzenanbaus in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen. *Berichte über Landwirtschaft (im Druck)*, Issue 3.

Keating, B. et al. (2000). An overview of APSIM, a model designed for farming systems. *European Journal of Agronomy*, Issue 18: 267-288.

Kersebaum, K. (1995). Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, Issue 81: 145-156.

Kim, J. & Verma, S. (1991). Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 55: 149-166.

Kiniry, J., Williams, J.R., Major, D.J., Izaurralde, R.C., Gassman, P.W., Morrison, M., Bergentine, R., Zentner, R.P. (1995). EPIC Model parameters for cereal, oilseed and forage crops in the northern Great Plains region. *Canadian Journal of Plant Science*, Issue 75: 679-688.

Knoll, M. & Rupp, J. (2007). *Stoffliche oder Energetische Nutzung von Holz? Nutzungskonkurrenzen um die Ressource Holz*. [Online] Available at:
http://www.holzende2020.de/custom/user/BasisStudie/Nutzungskonkurrenz_Holz_IZT.pdf
[Zugriff am 07 08 2012].

Von Koerber, K., Kretschmer, J., Prinz, S. & Dasch, E. (2009). Globale Nahrungssicherung für eine wachsende Weltbevölkerung - Flächenbedarf und Klimarelevanz sich wandelnder Ernährungsgewohnheiten. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, Issue 4: 174-189.

Koshkin, E.I., Motorina, M.V., Tret'yakov, N.N. (1987). Respiration and productivity of corn under conditions of different radiation regimes. *K.S. Timiryazev Agric. Academy, Moscow*, Issue Vol. 34, No. 2, pp. 276-285.

Krieg, D. (1983). Photosynthetic activity during stress. *Agricultural Water Management*, Issue 7: 249-263.

- Kropff, M.J., van Laar, H.H. (1993).** *Modelling Crop-Weed Interactions*. Wallingford, UK: CAB International.
- Lafarge, T. & Hammer, G. (2002).** Tillering Sorghum over a Wide Range of Population Densities: Modelling Dynamics of Tiller Fertility. *Annals of Botany*, Issue 90: 99-110.
- Lambert, R., Peeters, A., Toussaint, B. (1999).** LAI evolution of perennial ryegrass crop estimated from the sum of temperatures in spring time. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 97: 1-8.
- Larcher, W. (2001).** *Ökophysiologie der Pflanzen*. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Leopoldina, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften – (Hrsg.) (2012).** *Empfehlungen Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen*, Berlin
- Looden, S. (2011).** *Wasserwerke warnen vor Nitrat-Belastung*. [Online]
Available at: http://www.weser-kurier.de/region/niedersachsen_artikel,-Wasserwerke-warnen-vor-Nitrat-Belastung-_arid,250406.html
[Zugriff am 11 08 2012].
- LSKN (2012).** *Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen*. [Online]
Available at: <http://www.lskn.niedersachsen.de/download/64413>
[Zugriff am 27 11 2012].
- LWK (2010).** *Energiepflanzen in Niedersachsen*. Oldenburg: Landwirtschaftskammer Niedersachsen.
- Lynn, B. & Carlson, T. (1990).** A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 52: 5-43.
- Maier, J., Vetter, R., Siegle, V. & Spliethoff, H. (1998).** *Abschlussbericht des Forschungsvorhabens: Anbau von Energiepflanzen - Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung*. [Online]
Available at: http://www.inaro.org/download/AB_energiepfl0A.pdf
[Zugriff am 10 08 2012].
- Mailhol, J.C., Olufayo, A.A., Ruelle, P. (1997).** Sorghum and Sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management*, Issue 35: 167-182.
- McCown, R. L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M. (1996).** APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, Issue 50: 255-271.
- McMaster, G. & Wilhelm, W. (1997).** Growing degree days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 87: 291-300.
- Meier, U. (2001).** *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen*. s.l.: Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft.
- Mekonnen, M. & Hoekstra, A. (2010).** *The Green, Blue and Gray Water Footprint of Animals and Animal Products*, Delft, the Netherlands: Value of Water Research Report Series No. 48, UNESCO-IHE.

- Metzger, J. O. & Hüttermann, A. (2009).** Sustainable global energy supply based on lignocellulosic biomass from afforestation of degraded areas. *Naturwissenschaften*, Issue 96: 279–288.
- Meyer, R. F. & Boyer, J. S. (1972).** Sensitivity of Cell Division and Cell Elongation to Low Water Potentials in Soybean Hypocotyls. *Planta (Berlin)*, Issue 108: 77–87.
- Miller, M., Walker, G.K., Tollenaar, M., Alexander, K.G. (1988).** Growth and yield of Maize (*zea mays* L.) grown outdoors hydroponically and in soil. *Canadian J. of Soil Science*, Issue 69: pp. 295-302.
- ML (2010).** *Niedersächsische Ministerien für Landwirtschaft und für Umwelt*. Hannover: s.n.
- ML (2011).** *Die Niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen*. s.l.: Niedersächsisches Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung.
- ML (2012).** *Niedersächsisches Ministerium für Ernährung Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung*. [Online] Available at:
http://www.ml.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=1810&article_id=106425&psmand=7
[Zugriff am 11 08 2012].
- Monsi, M. & Saeki, T. (2005).** On the Factor of Light in Plant Communities and its Importance for Matter Production. *Annals of Botany*, Issue 95: 549–567.
- Monteith, J. (1977).** Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Society*, Issue Ser. B. 281: 277-294
- Mühlenhof, J. (2011).** *Anbau von Energiepflanzen Umweltauswirkungen, Nutzungskonkurrenzen und Flächenpotentiale*. Berlin
- NABU-Niedersachsen (2006).** *NABU kritisiert Auswüchse bei der Erzeugung von Energie aus Biomasse*. [Online] Available at:
http://niedersachsen.nabu.de/presse/pressemitteilungen/www.nabu.de/stundedergartenvoegel/www.nabu.de/stundedergartenvoegel/ergebnisse/index.php?popup=true&show=65&db=presseservice_niedersachsen
[Zugriff am 11 08 2012].
- NABU-Schleswig-Holstein (2012).** *Maisanbau zurückdrängen! Land muss Bund zur Verordnungsermächtigung des EEG auffordern*. [Online]
Available at: <http://schleswig-holstein.nabu.de/themen/energie-verkehr/energie/14697.html>
[Zugriff am 11 08 2012].
- NASA (2012).** *eoimages*. [Online] Available at:
<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/74000/74117/world.200408.3x5400x2700.jpg>
[Zugriff am 06 08 2012].
- Ottman, M.J. und P.J. Pinter, G.W. Wall, R.L. Vanderlip, S.W. Leavit, R.L. LaMorte, A.D. Matthias, T.J. Brooks (2001).** Elevated CO₂ increases Sorghum biomass under drought conditions. *New Phytologist*, Issue 150: 261-273.

Penning de-Vries, F.W.T. , Jansen, D. M., ten Berge, H.F.M., Bakema, A. (1989). *Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops.*. Wageningen: Simulation Monographs, Pudoc.

Piepyk, B. (2009). *Globale Bioenergienutzung - Potentiale und Nutzungspfade.* Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien.

Pietola, L. & Alakukku, L. (2005). Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Issue 108: 135-144.

Popkin, B. & Du, S. (2003). Dynamics of the Nutrition Transition toward the Animal Foods sector in China and its Implications: A Worried Perspective. *The Journal of Nutrition*, Issue 133: 3898 - 3906.

Rajala, A. & Peltonen-Sainio, P. (2001). Grain and Oil Crops. Plant Growth Regulator Effects on Spring Cereal Root and Shoot Growth. *Agronomy Journal*, Issue 93:936–943.

Richter, G.M., Jaggard, K.W., Mitchell, R.A.C. (2001). Modelling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 109: 13-25.

Rimbach, G., Möhring, J. & Erbersdoble, H. (2010). *Lebensmittel-Warenkunde für Einsteiger.* Berlin Heidelberg

Ritchie, J. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover,. *Water Resources Research* , Issue 8(5), 1204–1213.

Ritchie, J. , 2012. *Michigan State University, Dept. of Crop and Soil Sciences.* [Online] Available at: http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/ [Zugriff am 05 03 2012].

Robbins, J. (2010). *Food Revolution 3. Auflage.* Emmendingen.

Russel, R. (1977). *Plant root systems: Their function and interaction with the soil.* s.l.:European plant biology series, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.

Sage, R. & Sharkey, T. (1987). The Effect of Temperature on the Occurrence of O₂ and CO₂. *Plant Physiology*, Issue 84, 658-664.

Schaller, M. & Weigel, H. (2007). Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research*, Band Sonderheft 316.

Scholz, V., Hellebrand, H. & Höhn, A. (2011). *Produktion von nachwachsenden Energierohstoffen auf landwirtschaftlichen Flächen.* [Online] Available at: <http://www.dlv.de/grafiken/dlv/Scholz%201.pdf> [Zugriff am 10 08 2012].

Shangguan, Z.P. , M.A. Shao, M.A. , Ren, S.J. , Zhang, L.M. , Xue, Q. (2004). Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, Issue Vol. 45.

- Siddique, K. H.M., Belford, R. K., Tennant, D. (1990).** Root:Shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment. *Plant and Soil*, Issue 121, pp. 89-98.
- Siddique, M.R.B., Hamid, A., Islam, M.S. (2000).** Drought stress effects on water relations of wheat. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, Issue 41: 35-39.
- Sinclair, T. R., Tanner, C.B., Bennet, C. R. (1984).** Water use efficiency in crop production. *Bioscience*, Vol. 34(1).
- Sinclair, T. & Seligman, N. (2000).** Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*, Band 68, pp 165-172.
- Sionit, N. & Kramer, P. (1976).** Water Potential and Stomatal Resistance of Sunflower and Soybean Subjected to Water Stress during Various Growth Stages. *Plant Physiology*, Issue 58: 537-540.
- Soltani, A. & Galeshi, S. (2002).** Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: experimentation and simulation. *Field Crops Research*, Issue 77: 17-30.
- Stachowiak, H. (1973).** *Allgemeine Modelltheorie*. Wien
- Statistisches-Jahrbuch (2012).** *DESTATIS*. [Online] Available at: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2012.html> [Zugriff am 27 11 2012].
- Steduto, P. (2012).** *University of Bologna - Dista Genomics*. [Online] Available at: http://www.distagenomics.unibo.it/wuemed/P_steduto_biomass.pdf [Zugriff am 05 03 2012].
- Steduto, P. & Hsiao, T. (1998).** Maize canopies under two soil water regimes II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 89: 185-200.
- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D. & Fereres, E. (2009).** AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and underlying Principles. *Agronomy Journal*, Issue 101. 426-437.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Ferres, E. (2007).** On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, Issue 25:189-207.
- Steudle, E. (2002).** Aufnahme und Transport des Wassers in Pflanzen. *Nova Acta Leopoldina*, Issue NF 85 Nr. 323, Seiten 251-278.
- Stöckle, C., Donatelli, M. & Nelson, R. (2003).** CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, Issue 18: 289-307.
- Sung, F. & Krieg, D. (1979).** Relative Sensitivity of Photosynthetic Assimilation and Translocation of Carbon to Water Stress. *Plant Physiology*, Issue 64: 852-856.

The-Cancer-Project (2012). *Meat Consumption and Cancer Risk*. [Online]

Available at: http://www.cancerproject.org/survival/cancer_facts/meat.php

[Zugriff am 03 08 2012].

Thiagarajan, A. & Lada, R.R. (2007). Intrinsic changes in photosynthetic parameters of carrot leaves under increasing CO₂ concentrations and soil moisture regimes. *Photosynthetica*, Issue 45 (1):43-50.

Thomas, D. & Eamus, D. (1999). The influence of predawn leaf water potential on stomatal responses to atmospheric water content at constant C_i and on stem hydraulic conductance and foliar ABA concentrations. *Journal of Experimental Botany*, Issue Vol. 50 No. 331: 243-251.

Thrän, D., Rode, M., Pfeiffer, J. Ponitka, J., Edel, M., Knispel, S. (2011). *DBFZ-Report Nr.4*, Leipzig: DBFZ.

Todorovic, M. , Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M.-T., Stöckle, C., Steduto, P. (2009). Assesment of Aqua Crop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, Issue 101: 508-521.

UN (2011). *un.org*. [Online] Available at: http://unstats.un.org/unsd/syb/syb54/SYB54_Final.pdf
[Zugriff am 11 April 2012].

UNEP, Global Environmental Alert Service (2012). *UNEP*. [Online]

Available at: www.uneo.org/geas

[Zugriff am 20 11 2012].

Van der Werf, H.M.G., Meijer, W.J.M. , Mathijssen, E.W.J.M. , Darwinkel, A. (1993). Potential dry matter production of *Miscanthus sinensis* in the Netherlands. *Industrial Crops and Products*, Issue 1: 203-210.

van Diepen, C., Wolf, J., v. Keulen, H. & Rapoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, Vol. 5(1:16-24).

van Volkenburgh, E. & Boyer, J. (1985). Inhibitory Effects of Water Deficit on Maize Leaf Elongation. *Plant Physiology*, Issue 77: 190-194.

Vleeshouwers, L. M. (1998). *Potential yield of Miscanthus x giganteus in the Netherlands*.

Walter, H. & Lieth, H., (1967). *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena

Wang, K.-Y. , Kellomäki, S., Laitinen, K. (1996). Acclimation of photosynthetic parameters in Scots Pine after three years exposure to elevated temperature and CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, Issue 82: 195-217.

Wang, S. (2001). *Einfluss von Blattstellung und Bestandesdichte auf Ertrag, Qualität, Lichtaufnahme und Blattflächenindex bei Silomaisarten verschiedenen Wuchstyps*. s.l.:s.n.

Warren, C. (2006). Why does photosynthesis decrease with needle age in *Pinus pinaster*?. *Trees*, Issue 20: 157-164.

Warren, C. (2007). Stand aside stomata, another actor deserves centre stage: the forgotten role of internal conductance to CO₂ transfer. *Journal of Experimental Botany*, Issue Vol. 59 No. 7:1475-1487.

WBGU (2009). *Welt im Wandel - Zukunftsfähige Bioenergie und Nachhaltige Landnutzung*. Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung. Berlin

wetter.com-AG (2012). *wetter.com*. [Online] Available at:
<http://www.wetter.com/reise/laenderinfos/klimadatenbank/>
[Zugriff am 01 Juni 2012].

Whistler, F.D. , Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E. , Hodges, H.F. , Lambert, J.R. , Lemmon, H.E. , McKinion, J.M. , Reddy, V.R. (1986). Crop simulation Models in Agronomic Systems. *Advances in Agronomy*, Band Volume 40 pp. 141-208.

WHO (2012). *WHO*. [Online] Available at: <http://www.who.int/dietphysicalactivity/en/>
[Zugriff am 03 08 2012].

Willer, H. & Yussefi, M. (2001). *Ökologische Agrarkultur Weltweit - Statistiken und Perspektiven*

Witzke, H., Noleppa, S. & Zhirkova, I. (2011). *Fleisch frisst Land*, WWF-Deutschland, Berlin

Wuppertal Institut (2006). *Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen*, Wuppertal: s.n.

Yamaguchi, M. & Sharp, R. E. (2010). Complexity and coordination of root growth at low water potentials: recent advances from transcriptomic and proteomic analyses. *Plant, Cell and Environment*, Issue 33, 590–603.

Younis, M., El-Shahaby, O. A. , Abo-Hamed, S. A., Ibrahim, A. H. (2000). Effects of Water Stress on Growth\ Pigments and and CO₂- Assimilation in Three Sorghum Cultivars. *J[ournal of Agronomy and Crop Science*, Issue 185: 73-82.

Zenker, T. (2003). *Dissertation: Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung*. Technische Universität Berlin.

Zheng, G. & Moskal, M. (2009). Retrieving Leaf area index (LAI) Using remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, Issue 9: 2719-2745.

12. Anhang

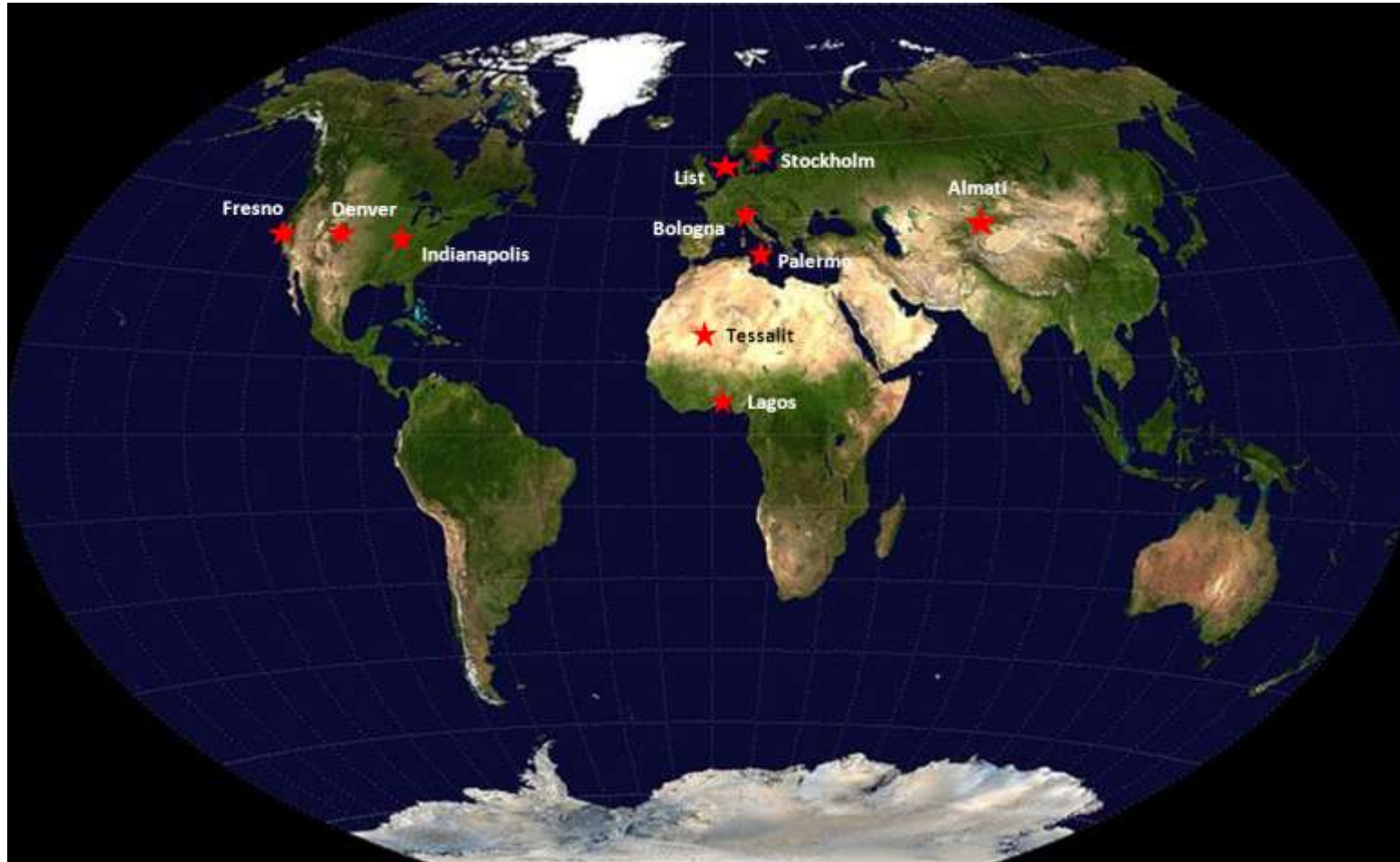


Abb. 12.1(40): Lage der 10 Stationen auf Satellitenbilddaufnahme Erde. Quelle: (NASA, 2012)

Bodenpunkte für Region Hannover

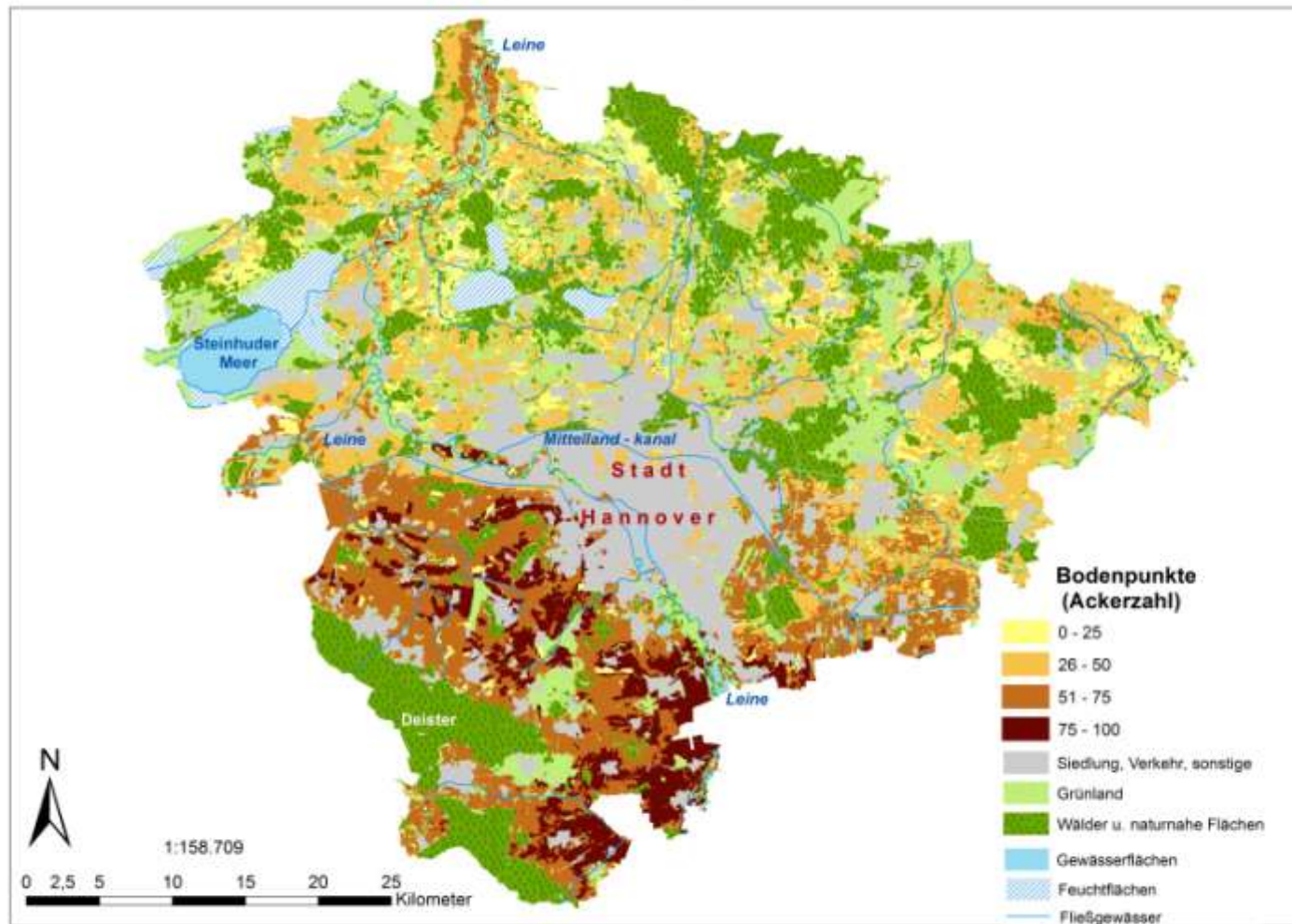


Abb. 12.2(41): Bodenpunkte Region Hannover

Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (NFKWE) für Region Hannover

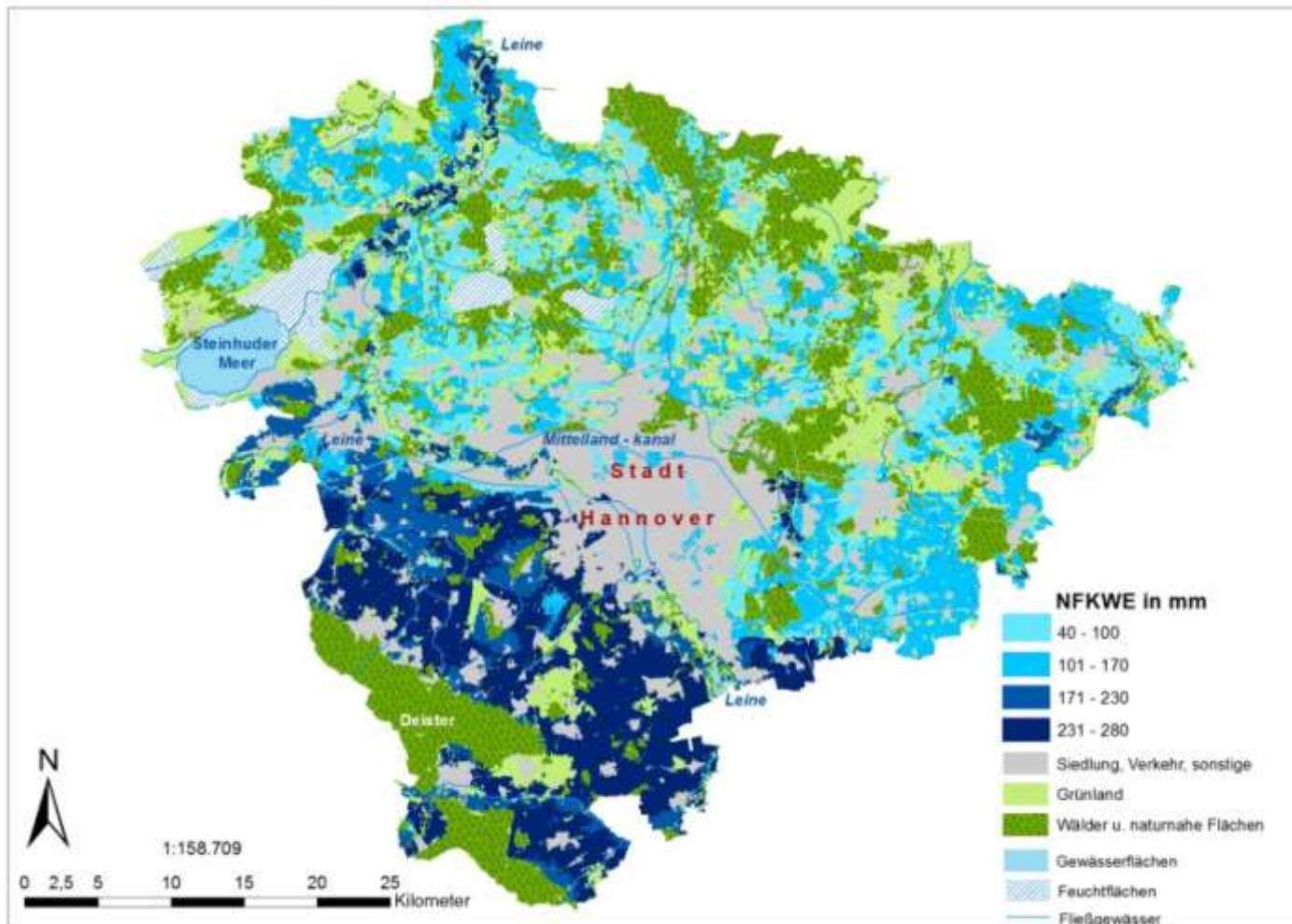


Abb. 12.3 (42): NFKWE Region Hannover

Ertragspotential Silomais für Region Hannover

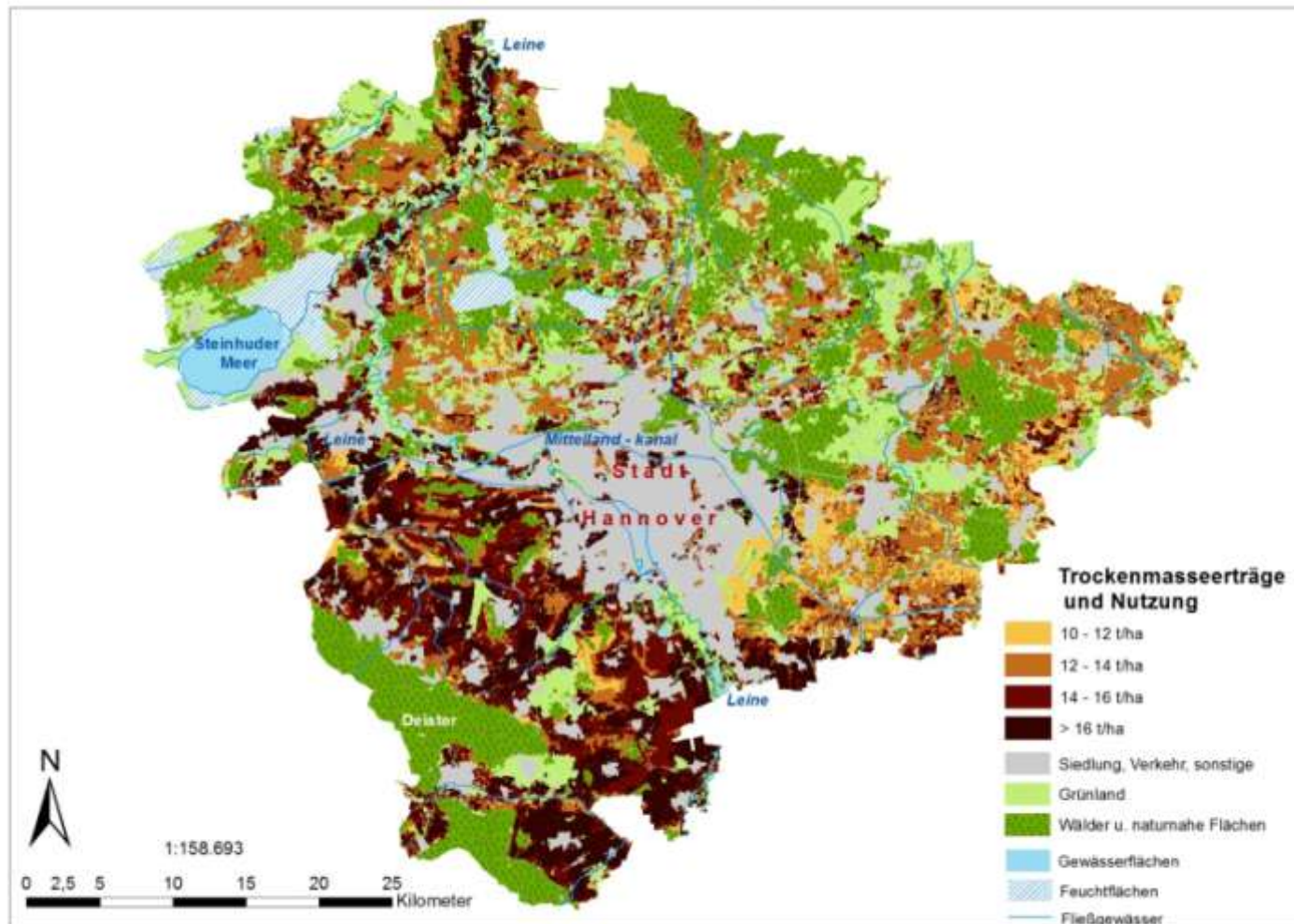


Abb. 12.4 (43): Ertragspotential Mais für Region Hannover

Ertragspotential Sorghum für Region Hannover

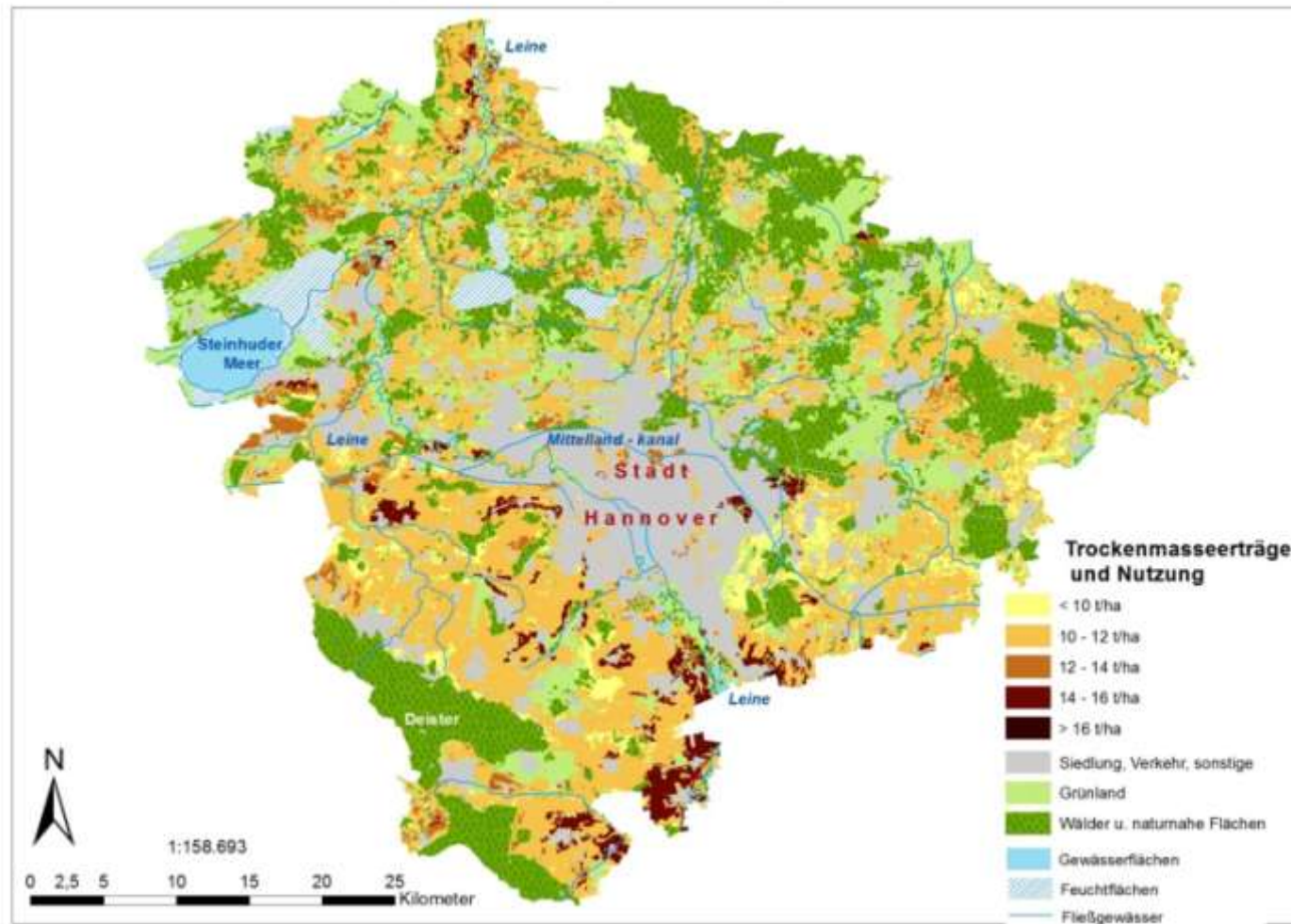


Abb. 12.5 (44): Ertragspotential Sorghum für Region Hannover

Ertragspotential Triticale für Region Hannover

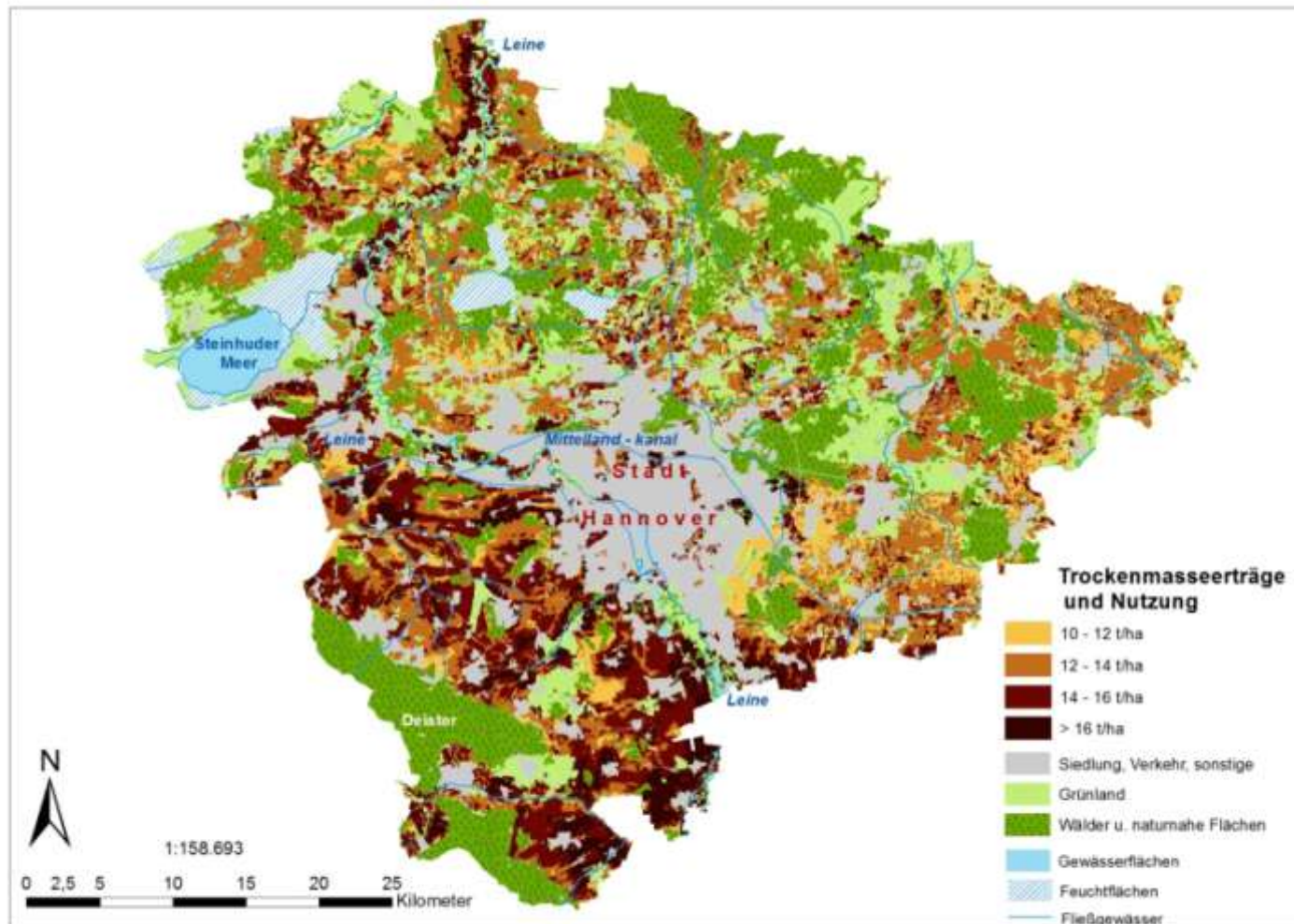


Abb. 12.6 (45): Ertragspotential Triticale für Region Hannover

Ertragspotential Sonnenblume für Region Hannover

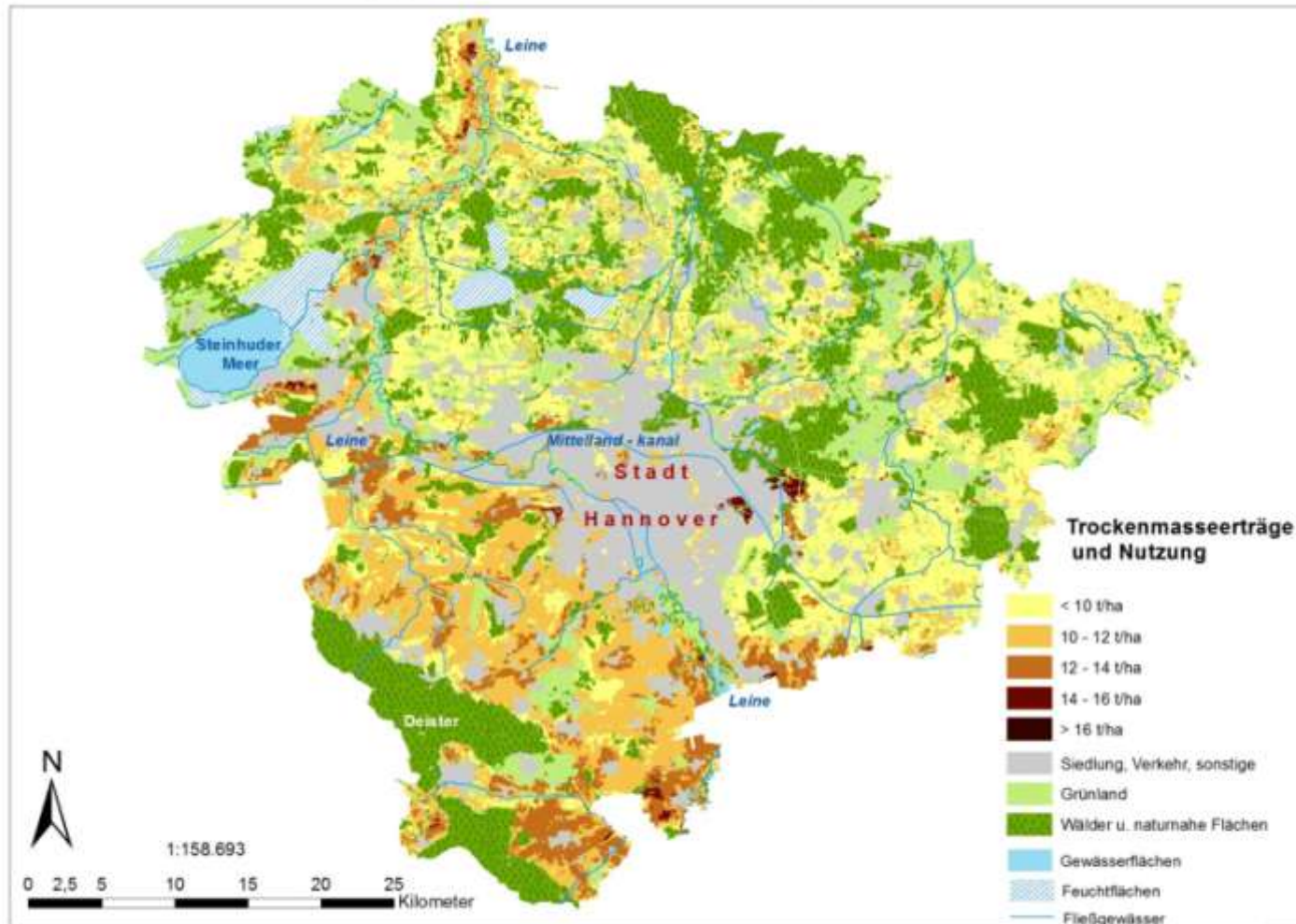


Abb. 12.7 (46): Ertragspotential Sonnenblume für Region Hannover

Bodenpunkte für Goslar und Wolfenbüttel



Abb. 12.8 (47): Bodenpunkte Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

NFKWE in mm für Goslar und Wolfenbüttel

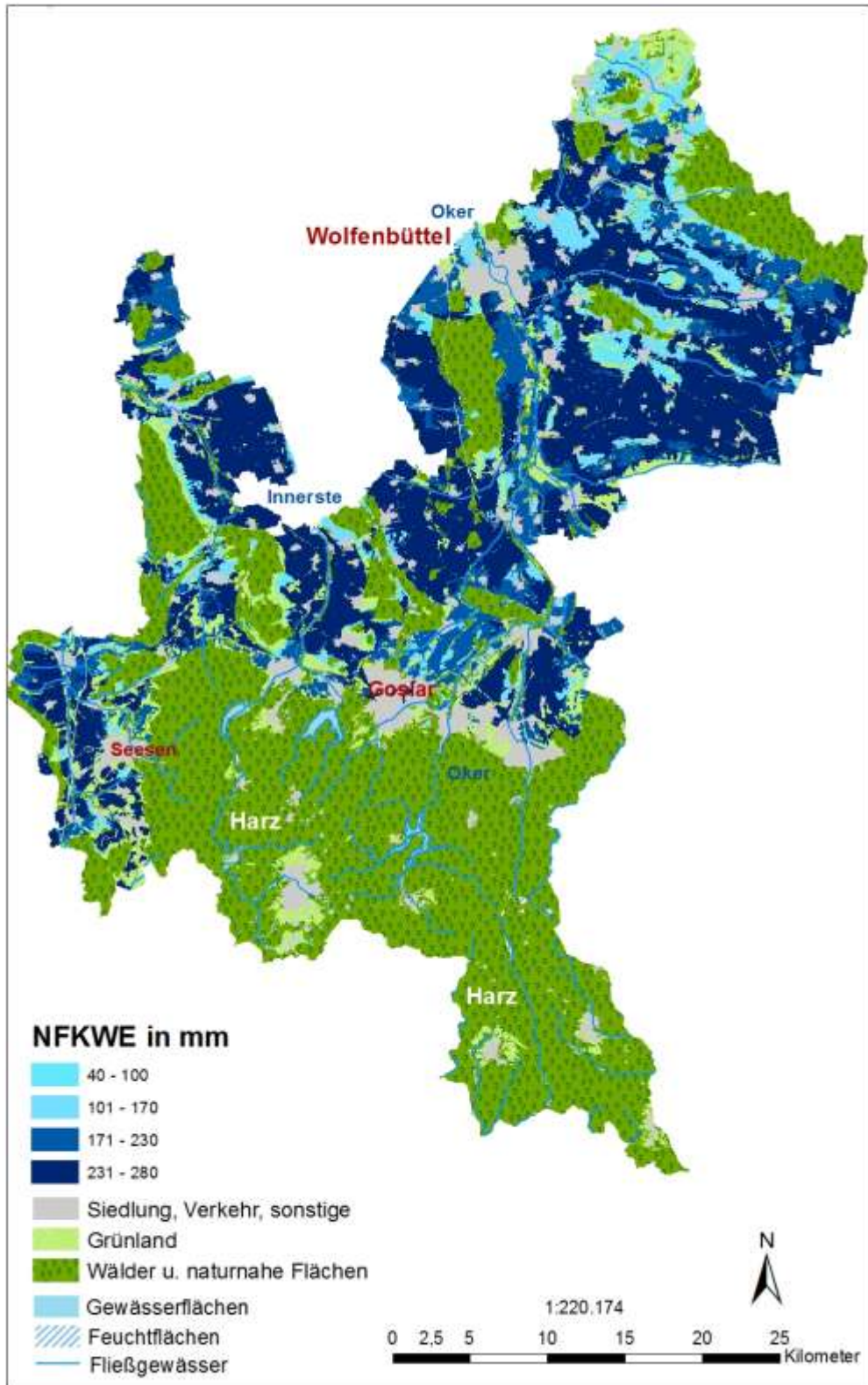


Abb. 12.9 (48): NFKWE Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

Ertragspotential Mais für Goslar und Wolfenbüttel

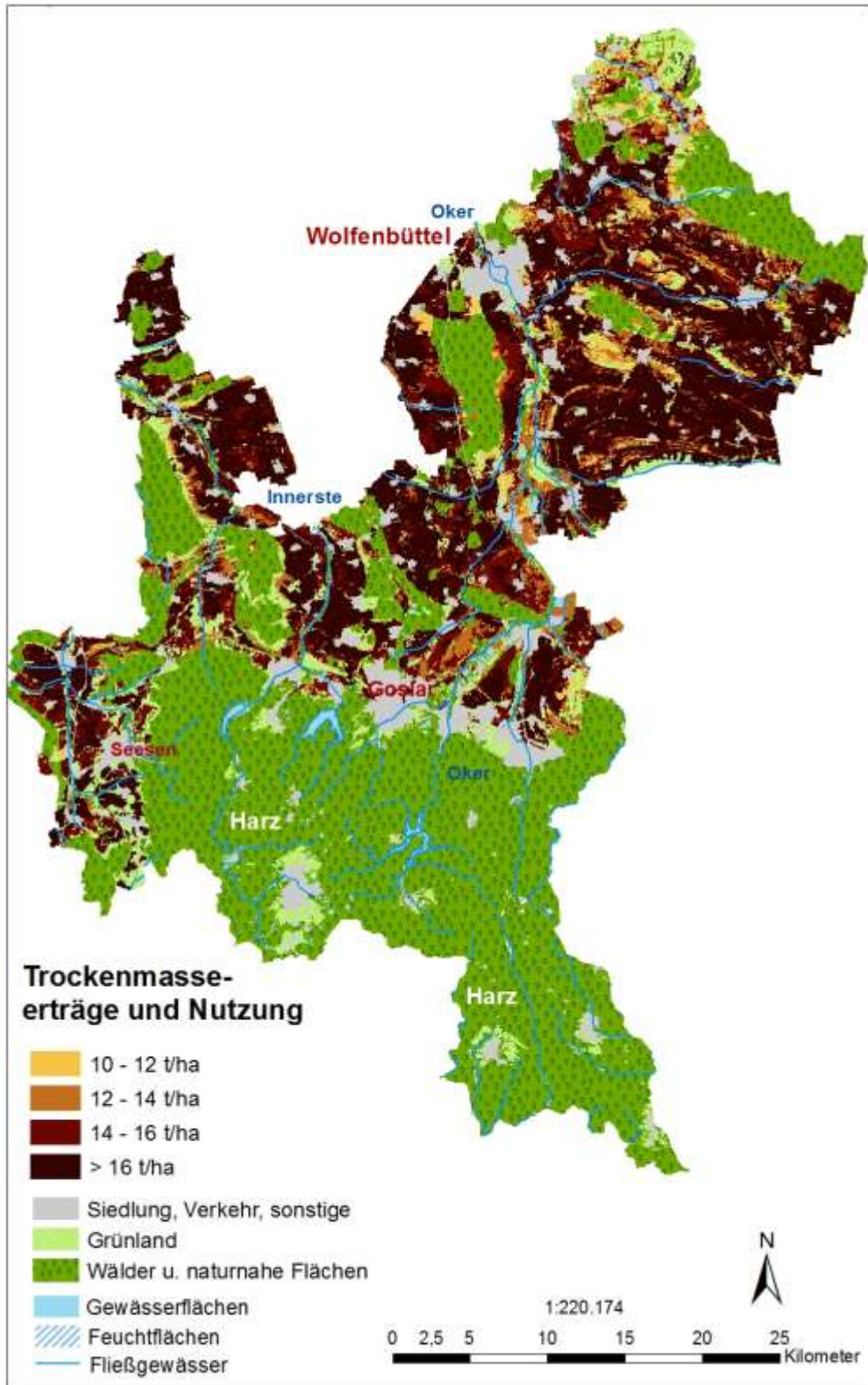


Abb. 12.10 (49): Ertragspotential Mais für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

Ertragspotential Sorghum für Goslar und Wolfenbüttel

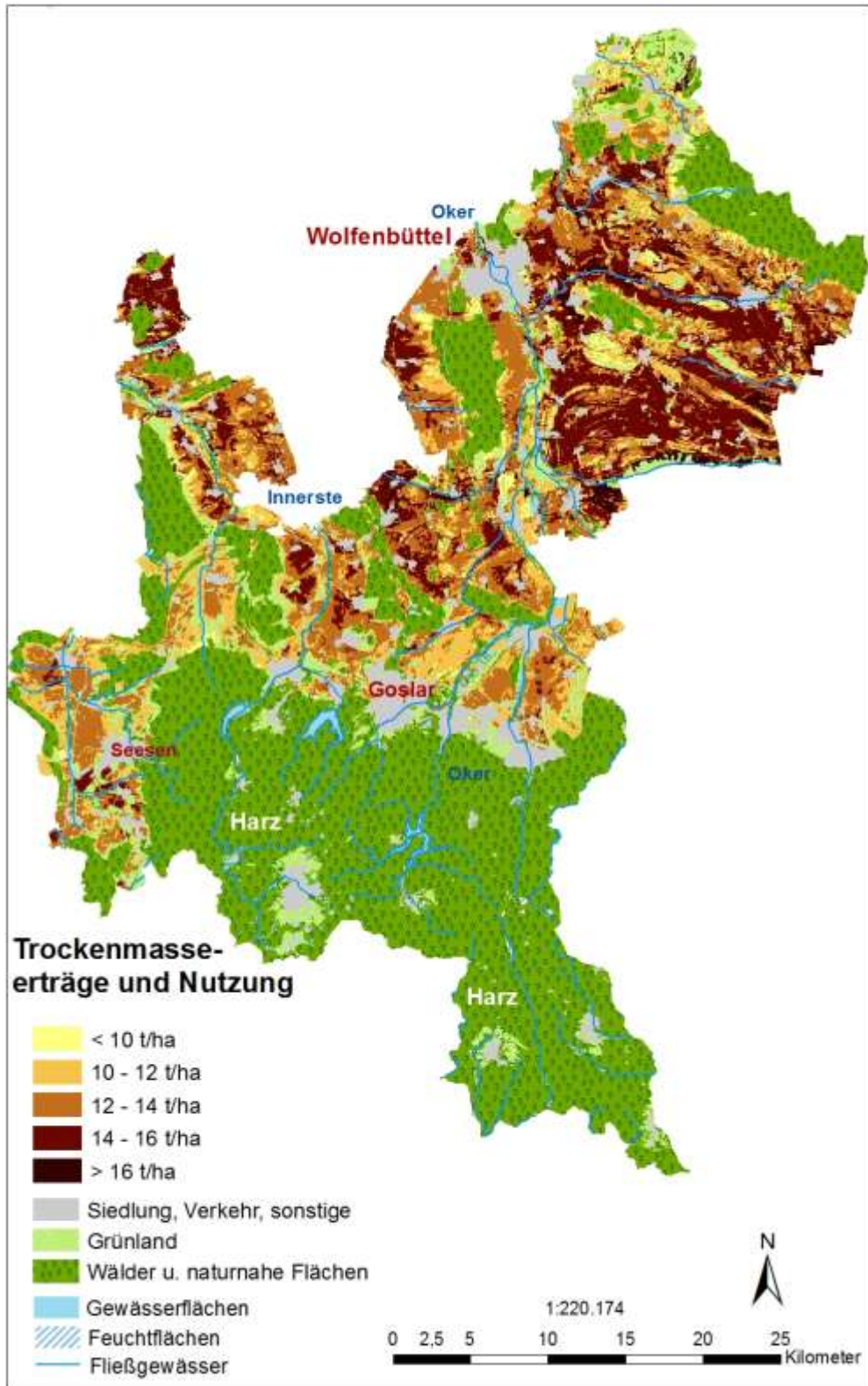


Abb. 12.11 (50): Ertragspotential Sorghum für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

Ertragspotential Triticale für Goslar und Wolfenbüttel

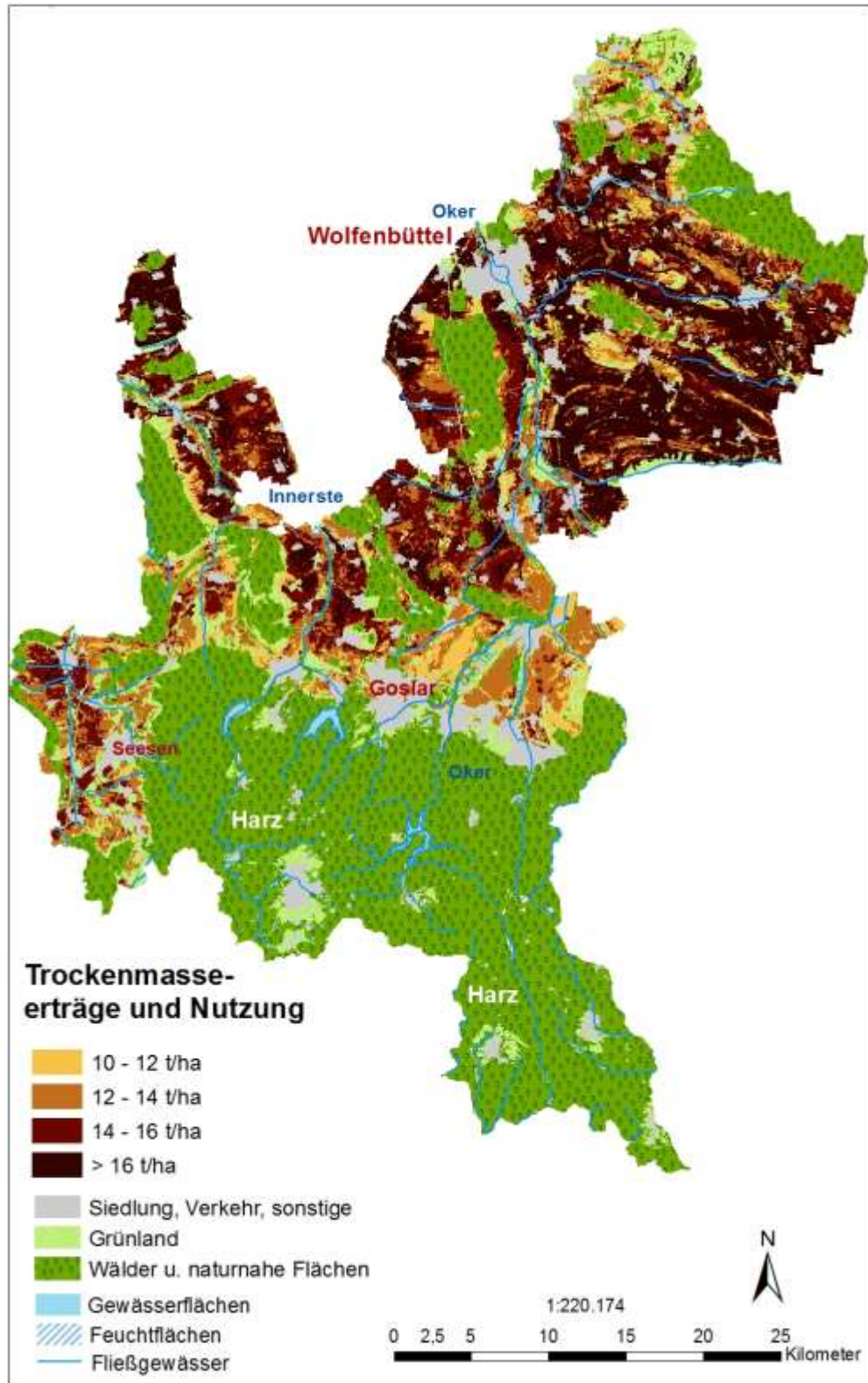


Abb. 12.12 (51): Ertragspotential Triticale für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

Ertragspotential Sonnenblume für Goslar u. Wolfenb.

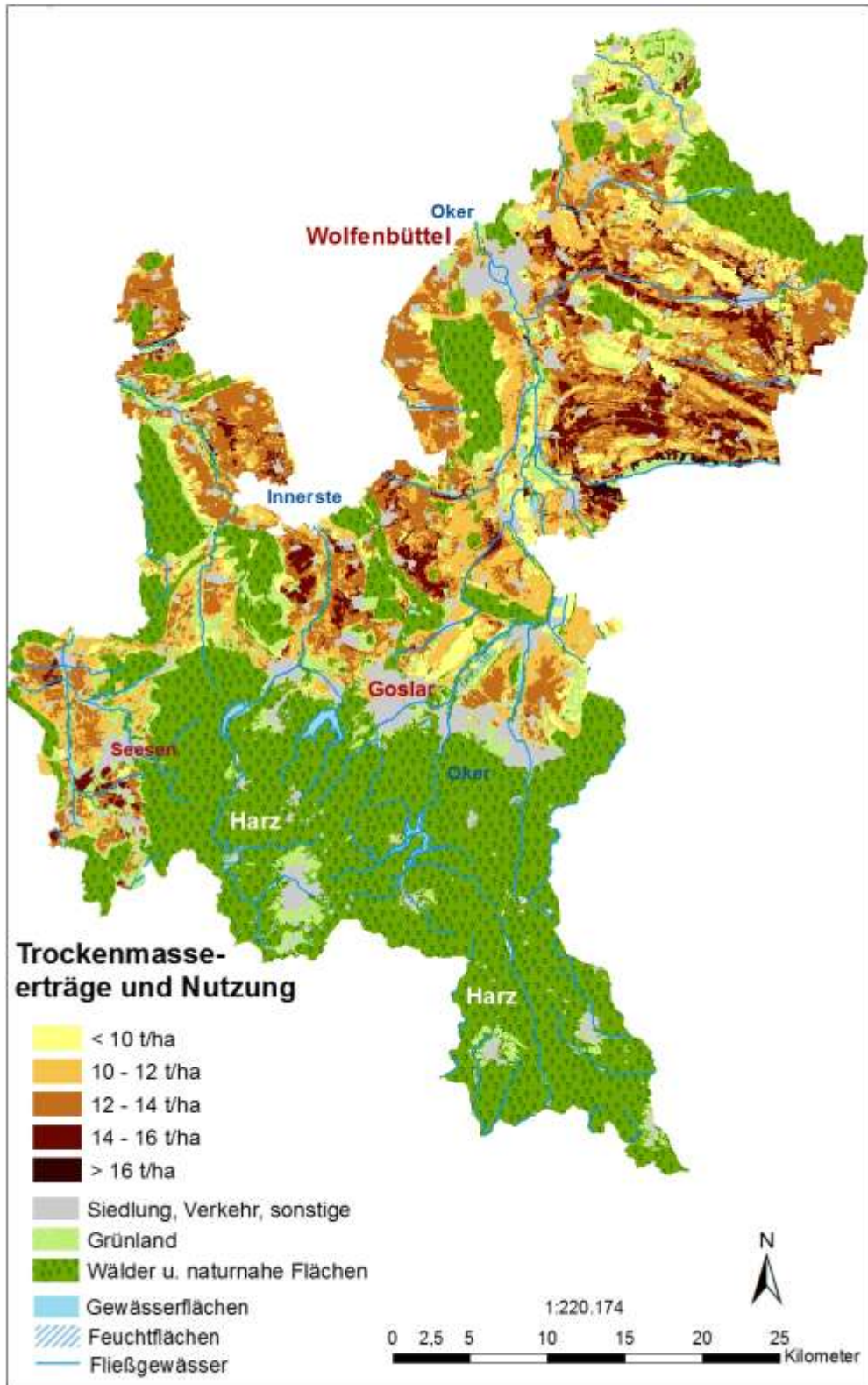


Abb. 12.13 (52): Ertragspotential Sonnenblume für Kreise Goslar u. Wolfenbüttel

Tabelle 12.1 (41): Klimadaten für Almati, Bologna, Denver, Fresno

Almati 43,17° N					Bologna 44,3° N				
Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]	Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]
Jan	-5,0	32,0	379	75	Jan	1,7	42,9	322	83
Feb	-4,2	37,0	738	76	Feb	4,5	44,9	677	78
Mar	2,3	71,0	1139	73	Mar	8,7	60,4	1160	70
Apr	11,4	104,0	1650	60	Apr	12,7	67,0	1562	71
Mai	16,2	107,0	2030	57	Mai	17,3	65,0	1973	69
Jun	21,0	64,0	2309	50	Jun	21,2	52,6	2193	68
Jul	24,0	32,0	2342	46	Jul	24,1	42,8	2262	65
Aug	22,5	26,0	2094	45	Aug	23,6	57,9	1951	66
Sep	17,4	30,0	1603	49	Sep	20,1	61,0	1438	69
Okt	9,5	62,0	1012	63	Okt	14,5	71,6	917	76
Nov	2,3	55,0	520	73	Nov	7,7	81,3	435	84
Dez	-2,6	33,0	281	77	Dez	2,8	61,0	249	84
Denver 39,4° N					Fresno, Ca 37° N				
Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]	Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]
Jan	-1,3	13,0	510	55	Jan	7,5	50,0	404	83
Feb	0,8	14,0	986	56	Feb	10,5	46,0	938	77
Mar	3,9	32,0	1513	54	Mar	12,5	48,0	1620	69
Apr	9,0	43,0	1996	50	Apr	16,0	25,0	2259	57
Mai	14,0	61,0	2267	52	Mai	20,5	8,0	2770	47
Jun	19,4	45,0	2501	49	Jun	25,0	2,0	2972	42
Jul	23,0	48,0	2456	48	Jul	27,5	0,1	2936	39
Aug	21,9	39,0	2168	49	Aug	27,0	1,0	2569	45
Sep	16,8	32,0	1711	50	Sep	23,5	6,0	1978	50
Okt	10,8	25,0	1189	49	Okt	18,0	14,0	1338	59
Nov	3,9	25,0	642	56	Nov	12,0	35,0	624	74
Dez	-0,6	16,0	381	57	Dez	7,5	36,0	300	84

Tabelle 12.2 (42): Klimadaten für Indianapolis, List, Palermo, Stockholm

Indianapolis 39,4° N					List, Sylt 55° N				
Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]	Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]
Jan	-3,7	71,0	397	75	Jan	0,9	57,0	287	90
Feb	-1,4	67,0	810	74	Feb	0,8	35,0	637	88
Mar	5,2	101,0	1256	70	Mar	2,8	45,0	1053	86
Apr	11,4	91,0	1744	66	Apr	6,2	40,0	1550	81
Mai	17,1	98,0	2144	67	Mai	11,1	42,0	1942	77
Jun	22,2	94,0	2376	68	Jun	14,4	56,0	2048	76
Jul	24,1	101,0	2318	73	Jul	16,0	62,0	1918	78
Aug	22,9	86,0	2026	75	Aug	16,5	72,0	1773	77
Sep	19,2	85,0	1566	74	Sep	14,0	83,0	1234	79
Okt	12,6	72,0	1040	72	Okt	10,5	89,0	788	84
Nov	6,2	82,0	497	76	Nov	6,1	94,0	403	86
Dez	-0,7	77,0	277	78	Dez	2,7	72,0	222	88
Palermo 38,7° N					Stockholm 59,2° N				
Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]	Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]
Jan	11,6	96,0	406	75	Jan	-2,9	39,0	291	87
Feb	11,9	77,0	810	72	Feb	-3,4	27,0	630	86
Mar	13,3	59,0	1288	68	Mar	-0,9	26,0	1169	80
Apr	15,8	44,0	1782	68	Apr	4,5	30,0	1588	73
Mai	18,9	27,0	2239	67	Mai	10,2	30,0	1995	64
Jun	22,6	12,0	2446	65	Jun	14,8	45,0	2185	66
Jul	25,2	5,0	2566	63	Jul	17,9	72,0	2017	71
Aug	25,5	17,0	2233	63	Aug	16,8	66,0	1756	78
Sep	23,6	43,0	1633	67	Sep	12,4	55,0	1280	81
Okt	20,2	85,0	1058	71	Okt	6,9	50,0	790	85
Nov	16,7	83,0	569	72	Nov	2,8	53,0	398	88
Dez	13,3	106,0	298	74	Dez	0,0	46,0	217	89

Tabelle 12.3 (43): Klimadaten für Tessalit und Lagos

Tessalit 20° N					Lagos 6,3° N				
Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]	Monat	T-Mid [°C]	N [mm]	Joule [cm ² /d]	LF rel. [%]
Jan	19,7	0,5	552	23	Jan	27,0	24	394	81
Feb	22,5	0,5	1082	19	Feb	28,0	45	821	79
Mar	25,7	1,0	1654	17	Mar	28,0	89	1230	76
Apr	29,4	1,0	2110	14	Apr	27,5	146	1675	82
Mai	33,3	5,0	2439	15	Mai	27,0	215	1917	84
Jun	35,8	6,0	2327	18	Jun	25,5	334	1702	87
Jul	34,9	17,0	2344	26	Jul	25,0	238	1551	87
Aug	33,9	26,0	2092	33	Aug	24,5	87	1404	85
Sep	33,5	12,0	1693	24	Sep	25,0	177	1138	86
Okt	30,5	1,0	1251	19	Okt	26,0	171	930	87
Nov	25,1	<1	723	22	Nov	26,5	66	568	84
Dez	20,3	<1	408	21	Dez	27,0	23	329	82

Tabelle 12.4 (44): Tagesklimawerte Poppenburg 1. April – 30. September 2007 - 2010

Datum	2007				2008				2009				2010			
	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
1.4	2004	0	7,5	63	806	2,2	7,7	82	2002	0	6,9	76	2036	0	5,8	56
2.4	850	2,4	4,3	81	846	6,8	6,4	89	1819	0	9,6	77	1362	0	8,3	61
3.4	2039	0	3,5	66	1083	0	6,6	83	2048	0	10,9	74	1393	6,7	7,9	75
4.4	1072	0	5,8	81	782	11	6,1	90	1426	0	12,5	72	962	0,2	7,2	70
5.4	1080	0	7,0	82	1298	2	4,2	81	940	0	9,6	74	2007	0	9,2	57
6.4	1376	0	5,9	72	795	2	2,9	92	1720	0	11,0	76	2096	0	10,5	60
7.4	1084	0	9,2	60	1717	0	4,7	73	1797	0	13,9	70	1429	0	8,5	82
8.4	1460	0	10,4	64	998	0,8	5,2	82	1051	0,3	12,6	68	1326	0	7,5	73
9.4	875	0	11,4	67	813	0,6	4,2	93	1538	0,4	12,2	77	998	0	6,4	79
10.4	836	0	9,8	71	820	0,6	5,2	94	2164	0	14,4	72	870	2	5,5	81
11.4	2197	0	10,4	67	-296	0,6	9,2	66	2152	0	14,5	69	944	0	6,5	79
12.4	2152	0	13,4	59	1059	7	8,9	77	2096	0	13,1	67	1800	0	7,7	73
13.4	2276	0	14,4	49	837	nd	7,1	92	2254	0	11,6	69	1332	0	7,5	71
14.4	2287	0	14,3	50	1256	0	6,3	80	2185	0	12,2	67	1397	0	7,9	60
15.4	2309	0	16,0	46	-288	0	4,6	79	2184	0	13,2	67	1393	0	6,5	71
16.4	1309	0	10,7	73	1569	0,7	5	82	2080	0	14,0	59	2297	0	6,8	65
17.4	1500	0	6,9	68	872	nd	5,8	88	1056	1,5	10,4	65	2330	0	10,5	55
18.4	2248	0	9,1	52	866	0	6,1	80	889	0	6,7	78	1485	0	7,3	68
19.4	1028	0	5,6	62	1500	0	8,1	75	2075	0	8,9	75	1806	0	6,7	63
20.4	2163	0	4,7	62	1904	0	9,8	70	2374	0	9,5	65	1523	0,3	5,2	63
21.4	2394	0	10,0	44	1561	0	10,9	64	2384	0	10,1	59	1811	0	5,7	64
22.4	2158	0	14,4	52	2261	0	10,8	64	994	0,2	7,6	80	2427	0	5,8	62
23.4	923	1,4	14,9	79	1411	3,7	13	63	1245	1,3	10,0	77	2284	0	8,6	59
24.4	2317	0	16,0	68	1405	0,1	10,8	77	2319	0	11,6	64	2340	0	13,4	50
25.4	2479	0	16,3	51	1731	0	12,1	68	2164	0	13,7	55	1040	8	12,1	80
26.4	2477	0	15,0	57	2071	0	14,8	57	2338	0	15,3	65	1305	0	11,3	76
27.4	2415	0	15,8	55	1674	6,3	13,8	71	1814	0	14,0	62	2308	0	13,0	61
28.4	2542	0	9,9	49	1144	0,8	10,9	85	920	0,9	10,9	88	1698	0	17,0	47
29.4	2504	0	9,1	52	2345	0,8	13,2	64	913	4,4	9,3	97	1478	0	14,8	65
30.4	2572	0	9,4	46	1814	2,2	11,5	70	1454	0	12,7	86	1759	0	11,4	68
1.5	2569	0	10,6	47	1640	3,2	9,5	82	1747	0	12,5	83	1011	1,6	9,0	84
2.5	2565	0	12,0	52	2525	0	10,8	70	2161	0	13,7	74	1052	35	9,7	92
3.5	2609	0	12,4	48	2630	0	11,3	67	1220	3,7	11,3	79	1237	0,6	6,8	77
4.5	2256	0	13,1	48	2480	0	13,3	72	1598	0,7	9,1	65	2424	0	6,4	65
5.5	2420	0	14,0	66	2670	0	14,3	65	1025	0,9	9,1	75	945	17,2	4,8	91
6.5	949	30	11,6	92	2617	0	15,1	64	957	6,4	11,0	89	949	3,7	6,1	92
7.5	1378	0,9	10,6	79	2721	0	16	57	2197	0	13,2	72	1281	0	7,9	83
8.5	1651	0,4	11,7	66	2717	0	16,3	58	1694	4,5	12,5	75	1274	0	10,2	77
9.5	1022	12	12,5	85	2760	0	16,3	59	2028	0,7	11,5	66	973	0,2	7,1	77
10.5	1063	6,2	11,0	83	2731	0	16,6	58	2509	0,1	13,9	63	977	0	8,4	81
11.5	1446	6,1	11,6	77	2640	0	17,5	56	977	0,2	11,1	78	1055	0,1	8,0	85
12.5	1671	1,5	14,9	72	2732	0	15,3	72	2657	0	11,0	65	973	1	7,0	88
13.5	1602	0	15,1	64	2763	0	14,7	65	2566	0	11,5	66	976	0	7,9	81
14.5	1521	14	10,5	80	1735	0,3	14,6	75	1799	0	12,5	60	980	5	5,9	85
15.5	1747	4,4	9,3	80	1172	10,3	14,5	91	992	20,8	11,6	86	1833	0	9,9	68
16.5	1887	0	8,5	71	990	11,4	11,4	96	1784	6,6	12,8	69	1641	0	10,4	73
17.5	2720	0	11,4	58	1600	0	10,7	75	1641	0,3	14,4	77	1200	0	9,0	75
18.5	1315	1,3	14,8	83	2087	0	10,5	68	2275	0,1	15,2	64	993	5,7	9,2	85

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Poppenburg

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
19.5	1827	0	16,6	73	2240	0	10,8	65	2144	0,4	15,0	62	996	5,6	10,3	82
20.5	2588	0	20,0	70	2581	0	11,6	65	2459	1,2	16,3	73	2464	0	14,4	66
21.5	2195	0	18,7	78	2710	0	13	61	1669	0	15,9	76	1027	0	12,0	90
22.5	1353	0	15,5	75	2229	0	14,3	66	2208	4,5	12,1	76	2162	0	15,2	81
23.5	1705	0	17,9	78	2894	0	14,2	61	2374	0	13,6	69	1880	5,2	16,0	77
24.5	2008	1,2	19,1	87	1450	0,2	13,9	76	2815	0	17,6	62	2046	0	11,8	69
25.5	1762	5,1	17,7	82	1052	0,4	15,3	81	2707	0	15,7	74	1925	3,7	8,5	78
26.5	1453	17	16,2	80	1506	0	14,7	76	1925	3	19,1	67	1202	0,2	10,7	82
27.5	1042	1,6	13,0	83	2010	0	18,5	70	2103	0,5	13,0	59	1531	0,5	12,8	77
28.5	1019	42	10,6	95	2226	0	19,2	64	2006	2,8	12,7	65	2474	0	13,1	62
29.5	2452	0	11,9	53	2594	0	20,8	68	2850	0	12,9	63	1360	14,6	12,7	85
30.5	2028	0	13,8	56	2320	3,9	20,8	78	2025	0,4	12,8	74	1023	0,9	9,8	93
31.5	2471	0	15,0	63	1833	0	20,6	83	1790	0	15,0	79	1025	0,1	13,8	78
1.6	1040	0	14,4	80	2754	0	22,6	73	2949	0	17,2	64	1946	0,1	13,5	74
2.6	1029	0	13,6	90	2178	0,3	20,7	78	2097	0	15,3	67	2931	0	15,7	64
3.6	1043	0	15,5	83	1902	0,2	18	83	1709	0	11,1	61	2921	0	14,8	69
4.6	1108	0	16,4	85	2876	0	18,6	63	1308	0,1	9,3	69	2886	0	16,9	64
5.6	1917	0	16,9	80	2715	0	17,8	62	1675	0	9,0	70	2674	0,1	19,7	61
6.6	2134	0	20,4	68	2464	0	19,1	65	1564	8,8	8,1	82	1502	0,2	16,1	77
7.6	2894	0	21,6	67	2972	0	20,1	54	1098	9,3	10,8	87	2376	0	17,5	66
8.6	2732	0	22,1	63	2898	0	19,8	54	2098	0,1	12,5	69	1960	4,8	20,9	66
9.6	2759	0	20,8	66	2609	0	19,7	61	1492	1,6	13,9	76	1595	15,2	20,0	83
10.6	2280	0	20,3	62	1534	0	14,5	65	1911	0	15,2	67	2292	3,1	19,9	72
11.6	1977	0,5	20,1	68	1611	7,5	12,7	71	1178	3,3	12,2	83	1078	3,4	13,3	86
12.6	1459	0	18,3	73	1637	2,7	11,8	81	1939	1,2	11,1	73	1611	0	11,7	74
13.6	1637	5,4	18,8	77	1549	1,6	11,9	77	2713	0	12,1	65	2664	0	13,2	71
14.6	1676	30	18,6	88	2209	2,1	12,7	73	1903	0	14,4	69	2360	0	13,2	70
15.6	1981	4,2	16,4	78	2387	0	13,4	67	1207	5,1	14,2	87	2983	0	13,4	66
16.6	2095	0,3	16,5	75	2451	0	14,1	67	1524	3	12,4	81	2971	0	15,4	63
17.6	1436	10	16,3	85	2375	0	17,5	59	2451	0,1	14,0	66	1994	0	12,8	78
18.6	2680	0	18,7	68	1563	5,4	18	65	1538	0	17,5	64	1652	0,5	10,9	76
19.6	2147	0	20,9	64	2210	0,2	16,9	66	1728	0,1	14,2	66	1627	0,6	12,0	75
20.6	1043	20	14,5	89	1893	0	17,5	64	1690	3,7	12,1	74	2350	0	11,8	70
21.6	1918	3,1	15,3	78	2020	7,7	22,3	66	1436	5,7	11,5	82	1462	0	14,3	71
22.6	1740	0,6	15,4	80	2895	0	17,1	62	1893	0	14,0	71	2502	0	16,4	66
23.6	1791	0	16,9	73	2881	0	15,2	64	2883	0	15,5	63	2882	0	18,5	62
24.6	1562	0,8	16,9	74	1625	0	19,1	68	2616	0	16,5	61	2552	0	17,6	67
25.6	1739	1,9	12,6	75	2258	0	18,5	60	1232	2	15,1	86	2652	0	15,8	67
26.6	1839	0	12,1	62	1813	0,4	17	59	1536	0,2	17,9	89	2956	0	18,4	65
27.6	1559	2,5	12,7	72	1267	0,1	17,5	77	1078	0	17,2	86	2878	0	20,5	60
28.6	1267	5	13,3	73	2635	0	19,4	63	1585	0,1	17,2	82	2547	0	21,9	57
29.6	1405	4,7	15,1	73	2468	0	18,2	60	2547	0	19,5	73	2749	0	20,1	67
30.6	1214	2,8	17,8	76	2821	0	19,7	61	2330	0	21,5	68	2329	0	21,2	65
1.7	1175	7,6	16,3	89	2946	0	22,6	61	2329	0	21,0	74	2745	0	24,6	52
2.7	1743	4	13,9	82	1805	34,1	21,6	75	2555	0	21,9	70	2768	0	24,7	61
3.7	1463	11	13,2	83	1246	0,7	15,8	84	2553	0,1	22,9	68	1830	0	20,9	76
4.7	1385	0,1	14,8	78	2155	0	18,1	70	2083	0	20,7	68	2068	0	19,6	72
5.7	1207	1,2	14,1	81	1874	2,5	19,9	64	2979	0	19,3	58	1978	0,4	15,6	71
6.7	1596	1,9	14,4	85	1834	3,3	17,1	65	1674	5,5	17,9	69	2759	0	17,2	60
7.7	2478	0	15,8	68	1466	1,5	16,1	72	1900	0,2	16,9	67	2793	0	22,7	50

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Poppenburg

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
8.7	1037	6,1	12,5	92	1728	3,9	15,8	70	1607	4,9	14,4	79	2765	0	25,0	47
9.7	1401	1,1	12,7	81	1083	3,2	17,8	87	1441	2,1	13,4	75	2623	0	26,8	49
10.7	1499	0,4	13,1	85	1132	1	18	84	1224	7,8	12,1	82	2104	0,2	25,9	63
11.7	1169	0	14,9	76	1871	0,7	17,3	69	1260	13,5	11,8	83	2478	0	25,7	61
12.7	1393	0,3	18,3	81	1416	0	15,5	70	1094	1,1	15,2	84	2386	0	22,7	62
13.7	2659	0	22,6	61	2116	0	16,5	69	2437	0	17,6	69	2521	10,3	24,9	55
14.7	2693	0	23,8	68	1673	0	19	63	2094	1,4	20,2	68	2291	0	20,4	62
15.7	2688	0	25,5	44	1144	6,8	15,8	85	1952	0,1	21,2	65	2638	0	22,0	55
16.7	2196	0,6	20,8	61	1404	1,1	14,8	73	2388	0	20,3	56	1294	1,1	19,0	74
17.7	2092	0	19,2	56	1001	1,5	14,8	83	1407	0,9	18,8	65	2554	0	17,0	60
18.7	1600	0	18,5	59	1285	5,4	16,6	79	1316	7	15,8	76	2862	0	19,6	52
19.7	2021	0,1	20,7	64	1231	4,6	14,2	83	1488	1	15,0	73	2820	0	22,0	51
20.7	1967	1,1	18,6	67	992	9,1	12,6	83	1497	3,9	15,3	69	2565	0	23,3	54
21.7	1465	9,7	16,9	81	1684	0	15,8	78	2204	4,7	19,1	62	1452	4,5	19,6	79
22.7	1672	0,8	16,4	71	2574	0	16,5	69	1440	3,6	20,2	72	1038	2,8	17,3	89
23.7	1358	6,1	15,1	77	2791	0	18,3	67	1684	1,9	19,7	74	1382	0	15,5	72
24.7	2134	0	16,6	67	1733	0	21,1	72	1780	1,7	16,7	76	2581	0	14,9	59
25.7	1820	0	19,6	62	2322	0	23,4	71	1626	7,9	14,9	82	1238	0,2	16,7	81
26.7	1815	1,5	17,6	67	2612	0	24,2	61	2117	0	16,2	63	1741	0	19,4	75
27.7	1045	9,8	15,7	82	2766	0	23,7	56	2371	0	21,0	50	1465	6,1	17,7	82
28.7	967	12	12,7	93	2058	2,3	22,7	66	2452	0	17,2	63	1472	4,8	16,1	85
29.7	1591	0	12,3	71	1868	0	21,7	77	2076	0	18,9	54	1443	0	17,7	71
30.7	1389	0,2	13,0	80	2573	0	23,9	57	2156	1,2	18,6	59	1979	0	20,4	58
31.7	2426	0	14,8	66	1759	20	21,8	72	2494	0	15,0	61	1409	5,1	22,0	68
1.8	1111	12	13,6	75	1729	0,2	20,8	65	1985	0	17,4	60	1869	4,2	18,5	80
2.8	1448	0,1	15,3	71	1467	6,7	19,7	74	1270	0,3	18,9	72	1375	0,1	16,1	80
3.8	2283	0	16,7	62	1693	0,2	18,4	71	1521	0	16,6	69	1540	5,1	15,3	81
4.8	2605	0	19,9	53	1869	0	18,4	63	2088	0	16,6	62	1000	1,7	16,3	91
5.8	2621	0	20,2	54	1584	0,2	20,4	69	2495	0	17,9	58	995	0,3	16,6	77
6.8	1862	0	18,0	80	2230	0,1	23,6	59	2415	0	20,4	59	2262	0	18,0	59
7.8	926	0	15,2	90	1548	0,9	18,7	74	1935	0	21,4	57	1264	0,6	17,5	74
8.8	1391	6,5	18,8	80	1866	0	16,2	65	1324	3,1	19,5	69	1114	1,1	17,3	81
9.8	928	11	17,9	94	912	4,1	17,6	77	957	0	19,0	80	1987	0	20,0	58
10.8	1380	0	16,5	78	1756	3,6	18,7	65	1313	5,3	18,7	78	1212	5,5	18,1	83
11.8	2139	0	15,5	73	962	20,8	17,4	87	1104	1,1	17,3	78	943	7,3	17,5	84
12.8	1296	0	16,1	65	1623	1	16,8	71	1146	0	17,5	77	1558	0	17,0	75
13.8	2171	0	17,6	61	2246	0	17,4	59	1869	0	16,9	70	1480	0	17,4	78
14.8	1509	0	21,0	72	1076	0	15,1	75	2052	0	15,6	63	892	6,6	15,8	96
15.8	1503	3,2	17,0	69	2157	0	15,2	71	2448	0	19,1	51	934	0,6	15,3	81
16.8	1567	1,6	14,2	69	2219	0	17	62	2391	0	21,4	53	881	7,5	14,4	94
17.8	1607	0	14,5	71	918	3,3	18,4	71	1697	3,6	19,0	67	1194	2,5	15,9	84
18.8	1270	0	15,4	80	1720	0	19,9	70	1936	0,1	16,8	66	2045	0	15,6	70
19.8	1580	0	16,3	77	1280	0,1	17,9	72	2351	0	20,4	53	2306	0	18,0	61
20.8	860	37	14,7	92	1623	0,4	18,9	63	2236	0	25,6	48	2144	0	21,5	63
21.8	1378	0,2	17,0	83	883	29,7	16,7	86	1035	6,2	17,0	83	1553	8,3	19,9	79
22.8	1371	4,1	16,7	84	1364	8,8	13,5	86	1809	0	15,8	66	1034	0,1	19,1	82
23.8	1583	1,3	18,1	81	1668	0,2	15,2	78	2299	0	16,7	58	1931	1,3	17,1	64
24.8	1956	0	18,2	77	969	0	16	81	2347	0	18,4	53	1310	0	15,5	69
25.8	1647	0	17,1	79	894	0	17	80	883	1	18,6	71	854	54,7	14,8	96
26.8	1341	0	14,5	67	888	0	17,8	76	2257	0	17,6	62	883	29,2	15,2	97
27.8	1562	0	13,2	73	904	0	17,7	81	1811	0	20,4	55	1276	0	12,9	84

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Poppenburg

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
28.8	1462	0	10,9	75	1125	0	17,8	78	1230	0	18,8	56	1087	4,7	11,8	85
29.8	1476	0,2	12,2	76	1660	0	16,5	78	1325	2,7	13,5	64	875	15,2	9,7	94
30.8	858	4,2	14,0	82	2055	0	17,6	66	1216	0	12,8	65	1377	0	13,4	78
31.8	1211	0	14,1	79	1002	0,1	17,4	73	2157	0	16,5	55	986	0,5	13,1	89
1.9	1181	0	15,3	71	1285	1,2	18,2	65	1954	2,1	19,5	54	879	0,6	13,0	93
2.9	1185	18	12,9	73	1254	2,4	14,7	78	1159	0	16,9	66	1698	0	13,7	73
3.9	1421	1,1	10,7	72	1800	0	13,8	72	1218	1,4	15,6	65	1210	1,4	12,2	83
4.9	1180	0	12,0	72	1425	6,1	16,9	72	1310	0	14,1	63	1689	0	10,2	86
5.9	1282	0,8	13,9	75	1021	0	18,6	77	925	12,1	12,5	84	2098	0,1	11,2	74
6.9	779	0,5	14,8	81	1243	0	17,4	68	852	0,1	12,4	80	1570	0	13,4	68
7.9	750	2,1	14,3	88	1103	0	15,7	73	1768	0	14,9	67	772	3,2	13,9	81
8.9	896	0,8	12,9	76	2060	0	16,8	68	2118	0	17,6	59	798	0,6	14,9	92
9.9	856	10	12,0	86	1464	0,2	18,8	72	1561	0	18,7	61	1464	0,3	14,7	86
10.9	1249	1,1	13,5	81	1605	0	18,5	79	770	1,1	15,6	76	1324	0	15,7	80
11.9	1014	0	13,3	78	1380	0	15,9	77	1313	0	13,3	75	1680	11,3	15,7	81
12.9	738	0	11,8	74	1977	0	11,4	61	1100	0	13,9	76	867	0,8	13,9	83
13.9	1487	2,7	12,3	74	1191	0	9,6	80	952	5,1	12,4	86	710	10,3	13,7	92
14.9	1424	0	11,4	69	939	0	10,2	81	721	0,1	12,5	84	1604	2,8	13,6	72
15.9	1887	0	13,3	68	920	0	10,7	78	704	8,8	13,8	87	1613	7,4	11,1	81
16.9	1350	2,7	16,1	76	1173	0	9,7	79	718	0	14,7	84	1182	2,7	11,3	81
17.9	933	7,9	10,1	82	1184	0	9	75	1308	0	12,0	80	1131	0,3	10,0	80
18.9	1599	0	9,6	65	1432	0	9,2	75	1861	0	11,7	76	1443	0,1	10,7	73
19.9	1401	0	13,6	65	1606	0	10,8	74	1848	0	14,4	74	896	0	14,4	66
20.9	1185	0	14,7	64	941	1	11,4	83	1525	0	17,0	77	1370	0	14,4	81
21.9	1645	0	14,3	72	820	1,7	11,1	88	1103	0	14,5	78	1777	0	13,8	76
22.9	1784	0	15,0	73	641	10,6	11,2	95	1594	0	14,2	66	1713	0	16,2	69
23.9	1549	0	16,6	69	774	0	12,2	86	901	0	14,9	73	651	4	14,9	86
24.9	1205	5,2	11,5	76	1005	0	9,7	88	1216	0	14,2	65	634	4,9	11,1	88
25.9	876	0,2	10,1	82	629	0	7,6	96	995	0	13,3	71	626	2,1	9,3	95
26.9	619	14	10,5	89	1616	0	10,1	84	1454	0	12,7	67	619	37,7	9,3	98
27.9	612	8,9	12,9	91	1525	0,2	12,1	77	1699	0	12,2	72	612	0,9	9,9	98
28.9	605	43	11,4	93	792	1,2	11,4	87	681	0	12,4	79	713	0,2	8,3	89
29.9	646	0	11,3	85	591	3,6	10,6	86	615	8,4	13,7	88	1268	0	8,5	81
30.9	1025	4	11,2	86	698	9,1	11,8	84	841	1,9	12,0	85	600	0	8,9	84

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Tabelle 12.5(45): Tagesklimawerte Werlte 1. April – 30. September 2006 - 2009

Datum	2006				2007				2008				2009			
	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
1.4	913	9,4	8,3	86	733	0	9,5	86	948	3,4	7,9	83	1819	0	11,0	77
2.4	758	1	6,1	90	1059	0	7,1	80	769	0,0	7,0	86	2027	0	13,2	73
3.4	1390	2,1	4,2	88	1172	0	6,2	91	775	0,6	7,3	87	769	0	10,0	90
4.4	1574	0,1	4,2	89	1637	0	9,8	87	881	4,1	6,8	85	1369	0	8,8	87
5.4	1331	0,8	6,3	74	1809	0,2	8,8	94	1453	0,1	3,7	78	1389	0	11,8	78
6.4	1227	0,1	7,6	77	1449	0	8,2	89	2030	0,0	3,3	73	1775	1,1	14,3	74
7.4	812	4,9	4,9	77	1545	0	10	73	1639	0,0	3,8	74	1351	1,1	10,8	86
8.4	1662	0,2	6,2	85	833	0	11	85	1626	0,0	5,1	71	1103	0	11,3	87
9.4	1319	0	4,8	86	791	0	12	83	1466	0,0	4,5	81	2186	0	16,0	70
10.4	1269	2,8	4,8	92	1989	0	12	81	853	0,0	5,0	89	1826	0	16,7	70
11.4	971	2,8	6,3	90	1993	0	13	86	1823	0,0	7,8	71	1926	0	15,4	67
12.4	657	0,6	8,8	90	2081	0	16	80	1366	0,0	7,5	76	1778	0	15,3	74
13.4	1465	0,2	7,3	82	2119	0	17	63	837	0,0	5,6	86	1753	0	13,9	82
14.4	1449	1,6	9,2	80	2144	0	19	59	1107	0,7	3,9	86	2196	0	15,6	71
15.4	1080	2,3	10,7	89	2081	0	16	88	1619	0,0	3,8	78	1748	0	15,7	61
16.4	1491	0,2	9,4	92	2177	0,1	9,5	88	1466	0,0	5,0	79	1918	0	12,3	62
17.4	1005	0,4	8	83	946	0	7,3	88	895	0,0	6,9	76	2376	0	11,7	58
18.4	1444	1,3	10,6	84	1633	0	10	84	1469	0,0	7,3	69	2213	0	11,0	71
19.4	1398	0	11,4	86	2206	0	6,5	67	1000	0,0	9,4	66	2409	0	12,7	64
20.4	1239	4,4	12,4	86	1859	0	8,3	77	2336	0,0	11,6	58	2431	0	12,5	64
21.4	590	0	9,1	94	1959	0	13	76	1901	0,0	11,6	57	1519	0	9,3	78
22.4	808	0	9,6	91	2114	1	16	77	2143	0,0	11,9	59	1842	0	10,9	72
23.4	1218	0	12,1	88	967	0	16	85	1140	3,2	11,9	74	2413	0	12,4	65
24.4	1897	0,8	14	86	578	0	21	75	1594	0,7	11,0	80	2023	0	15,3	54
25.4	745	0	12,4	89	1344	0	20	73	1092	0,1	11,2	78	1948	0,8	16,2	68
26.4	1771	0	9,4	89	988	0	18	73	2130	0,0	15,2	57	1376	1,7	12,5	78
27.4	1867	0,6	7,4	82	1608	0	17	79	1008	9,4	12,2	79	908	7,6	10,5	96
28.4	1641	5	5,8	87	695	0	13	61	1359	0,0	10,8	80	972	0	9,9	88
29.4	1172	0,1	5,2	93	1495	0	12	63	1795	0,1	13,8	59	1418	0	11,9	86
30.4	1712	1,6	9	93	1574	0	13	64	1993	5,1	11,0	72	1472	1,3	12,4	91
1.5	2119	0	13,4	81	1394	0	13	77	1977	2,4	9,9	83	1922	0	13,8	78
2.5	2177	0	19,6	57	2500	0	15	79	2104	0,0	11,7	70	1028	1	11,4	83
3.5	2395	0	19,4	61	1771	0	14	77	2630	0,0	13,9	55	1454	0	9,7	71
4.5	2504	0	18,4	55	678	0	12	89	2517	0,0	14,9	60	953	5,6	10,4	87
5.5	2453	0	17,7	57	2525	5,3	14	86	2609	0,0	16,1	55	1029	5,9	12,2	90
6.5	2453	0	17,8	55	2232	8,8	11	93	2677	0,0	16,8	56	1700	0,1	13,1	83
7.5	2462	0	18,2	63	955	3	11	82	2660	0,0	17,3	57	1597	0,2	12,2	79
8.5	2437	0	17,4	68	2064	6,3	12	76	2717	0,0	18,5	50	2186	0	11,7	68
9.5	2600	0	17,2	64	2035	10	12	91	2760	0,0	19,1	44	2302	0	12,9	66
10.5	2516	0	16,4	68	1457	16	11	89	2633	0,0	18,2	51	2247	0	10,9	71
11.5	2206	0	16,9	77	1876	5,6	13	80	2076	0,0	18,7	53	2755	0	11,4	66
12.5	1884	0	15	75	1453	0,1	16	75	2487	0,0	18,5	56	2603	0	13,0	58
13.5	2173	0	9	70	1813	1,9	14	76	2665	0,0	17,4	55	1639	0	14,0	57
14.5	1884	0,3	14,9	69	1867	4,3	12	82	1833	3,5	16,4	67	1090	18,9	12,4	81
15.5	1524	0	13,6	89	854	8,5	9,5	88	987	6,2	12,6	89	1846	0,4	13,0	75
16.5	1620	7,9	16,6	74	1302	0	8,7	83	990	4,2	10,5	90	1061	3,1	13,5	84
17.5	1562	4,6	15,2	81	720	0,3	17	78	2144	0,0	11,0	66	1781	0	13,9	74
18.5	854	20,3	12,2	87	1725	0	14	78	1740	0,0	9,2	68	1798	3,4	14,6	74

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Werlte 2006 - 2009

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
19.5	900	8,9	11,8	86	1390	0,9	18	77	1831	0,0	9,7	68	2112	0	15,3	73
20.5	909	3,2	13	84	691	0	17	89	2407	0,0	12,4	60	1657	0	14,8	74
21.5	1717	8,4	13,7	92	749	0	15	87	2673	0,0	14,3	58	2009	5,1	11,7	84
22.5	1294	2,9	8,3	88	729	0	15	86	2528	0,0	15,4	54	2461	0	14,6	72
23.5	1834	5,1	9	82	1650	0,2	18	71	2894	0,0	16,7	46	2852	0	16,0	72
24.5	846	2,3	9	89	2106	4,1	18	83	1212	0,9	13,9	75	2083	0	15,4	73
25.5	1453	7,8	11,2	90	1729	2,9	14	87	1090	0,7	12,9	85	1337	6,3	16,3	82
26.5	716	3	13,6	91	1553	1,3	16	89	1205	0,0	14,6	75	1540	0,7	12,5	74
27.5	1331	0	11,7	73	2629	5,7	15	92	1746	0,1	20,1	67	2107	1,4	13,7	75
28.5	1256	10,8	10	84	2633	2,8	11	91	1548	0,0	21,0	58	2411	0	13,6	70
29.5	1675	0,4	9,5	76	2470	0	14	72	2104	0,0	21,6	59	2201	0	15,4	65
30.5	850	0	10	70	2801	3,7	15	86	2358	0,0	19,3	72	1991	1,7	17,3	73
31.5	1411	1,4	9,5	81	2299	0	18	79	2286	0,0	19,8	70	2622	0	18,8	67
1.6	1658	0	12,5	77	1507	0	18	87	2288	3,1	23,3	64	2235	0	15,1	70
2.6	1503	0	12,8	75	2093	0	18	82	1736	7,0	20,0	83	1646	0,2	11,2	69
3.6	2403	0	10,9	62	1809	0	18	88	1032	0,3	17,8	89	1509	0,4	9,5	77
4.6	1327	0	9,8	81	2713	0	18	85	2498	0,0	19,1	66	1600	0	9,5	75
5.6	1624	0	12,2	87	2483	0	19	92	2500	0,0	19,6	54	1867	1,6	10,8	73
6.6	2315	0	13,8	86	1817	0	23	83	2414	0,0	20,4	57	1047	12,7	11,3	92
7.6	2901	0	15,7	72	2303	0	25	83	2921	0,0	21,1	51	2237	0,1	13,3	84
8.6	2876	0	18,5	75	1578	8,3	20	85	2784	0,0	20,1	56	1404	8,9	14,2	86
9.6	2977	0	20,7	77	2520	0,1	22	92	2216	0,0	17,4	71	1544	2,1	14,7	82
10.6	3002	0	22,6	54	2223	0	22	81	1711	0,2	13,8	72	1267	16,1	12,0	93
11.6	3006	0	23,6	60	2345	0	18	86	1307	0,0	12,1	75	2306	2,5	11,7	80
12.6	2885	0	24,6	60	1784	1,2	19	92	1320	0,5	11,8	77	2726	0	13,1	72
13.6	1595	0,1	16,5	80	2860	9,3	19	96	1346	2,4	11,4	81	1726	0	15,8	78
14.6	779	0,2	16,2	91	2424	5,7	18	96	1334	3,5	11,2	82	1156	0	14,3	85
15.6	821	0	14	78	2307	0,7	16	89	1867	0,0	11,2	79	1841	0	12,4	79
16.6	2407	0	15	81	1897	1	16	87	2172	0,0	13,6	67	2425	0	15,0	70
17.6	2650	0	22,2	60	1093	3	17	94	1677	0,0	15,5	64	1766	0,5	17,3	69
18.6	2186	0	20,2	73	1997	0	19	92	1386	1,2	15,7	75	2033	2,9	14,3	75
19.6	2248	0	19,5	76	1871	0	18	83	1995	0,1	15,5	69	1474	11,6	12,8	88
20.6	1051	2,3	16,3	76	1809	0,4	16	94	1728	0,0	16,9	67	1969	9,5	12,3	88
21.6	1763	0	15,4	71	2139	8,4	16	90	1994	11,8	21,0	66	2274	0	14,1	79
22.6	1398	0	15,9	83	1641	0,6	16	94	1981	0,0	15,0	68	2603	0	16,2	76
23.6	2428	0	20,2	74	2010	2,5	16	90	2653	0,0	14,1	63	3034	0	18,1	67
24.6	1775	7,8	20,2	84	2349	3,9	15	94	2399	0,0	18,0	64	2247	0,1	18,6	73
25.6	795	0	17,4	89	2713	6,9	12	93	2486	1,1	17,6	65	1295	16	18,8	92
26.6	1051	0,1	14,1	92	1022	1,3	14	84	1851	0,9	15,4	75	1307	0	19,2	87
27.6	2286	0,2	13,7	87	1972	0	13	88	1508	2,8	17,4	84	1686	0	18,9	83
28.6	2889	0	16,5	75	1805	7	15	87	1862	0,0	17,3	75	2218	0	21,0	77
29.6	2780	0	20,4	69	2374	8,4	16	86	2392	0,0	17,4	66	2559	0	21,7	75
30.6	2935	0	21,3	68	1607	3,1	19	81	2910	0,0	19,8	59	2544	0	21,5	77
1.7	2881	0	23,3	57	1555	1,5	17	88	2655	2,8	24,8	54	2682	0	22,5	74
2.7	2918	0	23,2	53	1237	8,6	15	89	1539	5,5	19,8	83	2275	0,5	23,0	76
3.7	2650	0	25,2	56	1311	8,1	14	91	1208	34,8	15,3	94	2134	0	20,0	74
4.7	2386	9,9	23,3	79	1689	1,9	16	84	2597	0,1	17,9	71	2802	0	20,1	68
5.7	2043	0,1	21,3	85	1106	5,8	14	90	2178	0,0	19,1	70	1750	19,2	18,7	79
6.7	1357	11,9	20,8	86	1647	4,5	15	83	1645	12,7	15,5	78	2342	3,8	15,8	84
7.7	1951	0,8	18,6	85	2503	4,7	16	67	1479	4,9	15,0	83	1405	11,6	15,2	91

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Werlte 2006 - 2009

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
8.7	1193	1,8	20,3	78	1378	4	14	86	1514	8,8	15,4	75	1756	1,1	14,4	81
9.7	1976	0	20	83	1703	7,1	13	92	1046	13,5	17,2	94	1035	10,9	13,0	92
10.7	1763	2	18,4	85	1046	4,5	14	94	1673	4,0	16,8	85	1461	1,5	13,9	85
11.7	2801	0	19,3	82	1207	1,1	16	84	1519	1,4	15,1	81	1094	2,7	15,0	97
12.7	2809	0	19,3	85	1557	0	20	81	2031	0,0	14,6	75	2688	0,1	17,8	81
13.7	2663	0	16,2	75	2282	0	22	70	2228	0,0	17,2	70	2358	0	20,0	75
14.7	2797	0	19,8	79	1940	0	23	74	1009	3,6	17,0	82	2617	0	20,6	71
15.7	2793	0	22,1	56	2500	1	25	68	1457	0,7	16,1	80	2851	0	19,7	71
16.7	2788	0	23,4	59	2083	0	20	70	1141	0,1	14,5	82	1494	6,8	19,0	78
17.7	2767	0	22,6	61	2304	0,8	18	73	1026	6,3	14,9	91	1204	1,8	16,3	83
18.7	2742	0	25,1	77	2337	0	19	70	1222	9,6	15,6	92	1575	1,8	15,5	85
19.7	2252	0	25,4	58	1372	13	19	82	1593	2,4	14,0	80	2046	0,1	16,3	76
20.7	2567	0	22,8	81	2366	3,7	18	71	1129	2,6	13,2	88	2303	3	18,5	75
21.7	2005	8,6	23,8	77	2112	4,4	17	80	1349	0,1	14,5	83	1415	1,2	20,9	84
22.7	1562	0	22,5	90	1560	1,2	16	83	1221	0,1	15,9	86	1138	16	17,5	93
23.7	2303	0	22	87	1345	3,7	16	85	2829	0,0	18,7	68	1519	2,4	16,1	89
24.7	2583	0	23	76	2122	0,1	17	76	1956	0,0	21,5	69	1688	2,5	15,7	85
25.7	2382	0	25,2	67	1275	3,7	19	79	1580	0,0	24,1	72	2092	0	17,3	76
26.7	1901	0	24,5	74	1803	3,6	17	74	1995	0,0	23,4	74	1753	2	19,8	72
27.7	1407	0	21,9	85	1489	4,8	16	82	2716	0,0	24,9	56	1613	0	16,2	87
28.7	2240	0	22,5	85	1103	7,6	13	92	1935	7,2	22,4	72	1645	0	19,9	66
29.7	1256	15,4	22	80	1529	5,2	12	84	2322	0,0	20,7	75	1800	14,2	16,6	82
30.7	1930	2,5	19	87	1500	2,3	13	82	2451	0,1	24,4	66	2592	0,1	15,5	77
31.7	1248	2,3	16,7	82	2622	0	16	70	1722	0,0	21,2	73	1728	0	18,2	72
1.8	1231	3,6	15,8	89	1160	0,8	15	84	1875	0,5	18,4	73	1062	5,4	17,5	91
2.8	963	13	15,2	95	2315	0	17	72	1224	16,3	18,9	84	2022	0	16,9	78
3.8	1574	5,5	16,7	91	2588	0	19	70	1669	12,8	17,3	80	2259	0	18,0	72
4.8	1913	0	19,7	91	2592	0	22	63	2099	0,4	18,2	78	2520	0	20,6	60
5.8	1926	0	19,6	92	2512	0,9	23	58	1766	0,0	20,9	79	2548	0	22,0	64
6.8	1348	0	19,5	83	930	0,2	18	90	1928	4,8	21,5	80	2310	1,3	23,2	66
7.8	854	0	17	79	926	1	15	93	1343	1,1	17,0	86	962	0,1	19,0	93
8.8	1038	3,5	15,2	85	933	0	18	92	1842	0,6	16,3	74	957	0	18,6	90
9.8	791	0,5	14,1	89	1397	0	19	88	1188	0,4	17,6	85	1506	0,3	19,2	79
10.8	1097	17,6	13,9	89	1943	0	16	78	1362	0,0	17,0	79	1439	1,7	18,1	86
11.8	1231	0,2	14,5	91	2175	2,9	17	76	1499	0,7	17,5	79	1230	0,1	17,6	84
12.8	1846	9,9	15,3	89	1833	0	18	80	2004	0,1	16,4	73	2084	0	16,5	80
13.8	628	21,2	15,6	90	1921	4,8	20	65	2115	0,0	16,1	70	1552	0	15,7	78
14.8	996	0,2	16,6	88	1296	2,5	22	75	2296	0,0	14,9	76	2471	0	20,6	65
15.8	1566	0,1	17,4	90	1289	2	17	81	2240	0,0	15,4	71	1965	0	19,6	78
16.8	1319	1,4	18,7	88	1602	0	14	77	1583	2,2	16,8	72	1295	0	17,2	83
17.8	1231	8,5	17,4	91	1936	0	16	71	976	11,6	16,4	92	2172	0	18,1	73
18.8	1700	0,8	20,1	87	1223	0,2	17	79	1135	1,4	17,5	82	2269	0	20,8	68
19.8	1264	10,5	16,7	93	1404	0	17	83	953	3,8	16,6	86	1908	6,8	24,3	64
20.8	1076	9,2	15,4	94	860	20	16	95	1075	0,1	16,9	79	1490	0,6	18,2	84
21.8	1038	12	15,6	93	1774	0	18	81	1208	9,4	16,0	86	2042	0	16,0	78
22.8	1520	0	16,1	94	1789	1	19	80	843	9,7	12,6	94	2276	0	17,3	69
23.8	1218	5	17	93	2069	6,1	20	78	1437	0,5	14,9	82	2324	0	19,7	63
24.8	1252	0	16,1	93	1506	0	19	84	1153	0,0	16,2	84	860	1	17,9	89
25.8	988	1,3	15,1	94	1418	0	17	82	825	0,0	17,3	85	1889	0,1	17,6	73
26.8	1055	6,8	13,6	93	1146	0,1	14	79	819	0,2	16,6	88	1398	0	19,2	76
27.8	1030	16,4	12,4	92	1813	0	14	74	1007	0,0	17,8	84	1288	2,4	16,7	79

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Werlte 2006 – 2009

Datum	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF	R	N	T	LF
28.8	1449	6,3	12,4	94	1439	0	12	77	1601	0,0	18,0	80	1621	3,1	13,3	83
29.8	1214	0	13,5	90	977	2,6	13	90	1965	0,0	16,0	80	1408	0,5	14,2	82
30.8	1231	0,7	15,2	95	846	3,4	15	89	2089	0,0	19,0	70	2111	0	17,5	72
31.8	929	0	18	88	1335	0,4	14	87	1103	0,0	16,8	79	1448	3	18,2	75
1.9	988	0	17,8	87	890	12	15	88	816	6,7	15,7	80	1338	0,1	16,3	80
2.9	913	2,1	19,2	87	1598	1,4	13	82	1043	2,3	13,8	86	1051	5,2	14,8	82
3.9	1197	0	15,7	91	1633	1,8	11	79	1678	0,0	14,2	76	1622	4,3	14,0	79
4.9	892	1,8	16,2	95	914	0,3	11	82	1094	1,8	16,3	77	1036	5,9	13,8	91
5.9	1164	0,4	19,5	91	1436	0,2	16	83	1207	0,0	17,6	76	962	0,1	14,2	85
6.9	1059	2,3	15,5	92	1086	0,4	16	84	1100	5,3	15,5	82	1636	0	16,3	80
7.9	1553	0	12,8	89	761	0,9	15	91	853	0,5	14,7	87	2052	0	18,2	77
8.9	1591	0	13,8	94	755	0,6	14	81	1789	1,7	16,0	78	1245	0,1	16,8	86
9.9	1754	0	16,6	87	954	12	13	89	1529	0,0	17,5	82	1225	0	15,5	80
10.9	1662	0	17,9	91	828	0,3	14	89	1787	0,0	18,6	75	1011	0	13,8	85
11.9	1712	0	20,3	91	874	1,2	13	90	1337	0,3	18,0	70	1218	0,3	13,8	87
12.9	1687	0	21	89	728	0	12	83	1977	0,0	12,9	61	1166	2,7	14,4	86
13.9	1683	0	20,6	82	1221	1,8	11	88	1402	0,0	11,7	74	849	0,5	14,5	87
14.9	1566	0	19,6	76	1582	0	12	80	1171	0,0	11,3	79	704	1,3	15,7	85
15.9	1315	0	19,4	84	1666	0	14	78	732	0,0	11,3	82	1202	1,6	15,0	89
16.9	1277	0	19,6	89	690	6,9	14	93	1017	0,0	11,7	77	952	0	11,6	85
17.9	427	0	16,5	91	1256	2,2	11	85	1143	0,0	8,5	79	1861	0	12,6	82
18.9	641	3,7	13,6	91	1547	0	11	77	1340	0,0	8,4	79	1775	0	16,4	78
19.9	1549	0	13,7	89	710	0,1	14	83	1626	0,0	8,9	79	1401	0	15,9	88
20.9	1537	0	17,8	85	785	0	15	80	920	0,1	10,6	86	1503	0	13,0	82
21.9	1403	0	20,8	76	747	0	13	89	749	0,0	11,9	80	1247	0	14,5	78
22.9	888	0	19,2	84	1591	0	15	85	641	5,8	12,5	92	993	0	15,8	79
23.9	842	0	19,6	79	1185	2,1	15	85	814	0,0	12,7	86	1256	0	13,1	82
24.9	879	0	17,6	89	1205	1	11	89	1633	0,0	11,5	81	654	0	12,0	90
25.9	465	0	16,6	90	1055	0	10	90	936	0,0	8,0	93	1264	0	12,6	84
26.9	917	0	15,5	92	817	10	11	86	1400	0,0	9,1	86	1531	0	12,5	84
27.9	816	0	16,4	90	612	11	14	93	908	0,1	10,3	90	681	0	14,3	89
28.9	791	0	17,4	86	605	10	12	97	608	1,9	10,4	96	605	6,1	14,3	97
29.9	971	0	15,7	91	627	0,2	11	93	591	30,9	10,9	94	617	1	12,8	97
30.9	611	13,2	15,4	93	591	0,8	9,7	90	698	17,9	10,7	92	1015	3,5	11,8	87

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Werlte, Jahr 2010

2010

Datum	R	N	T	LF	Datum	R	N	T	LF	Datum	R	N	T	LF
1.4	1949	0	7,5	61	19.5	2174	0	13,6	63	6.7	2632	0	17,9	65
2.4	937	3,3	8,4	80	20.5	2824	0	13,1	75	7.7	2592	0	23,6	57
3.4	955	4,3	8,1	91	21.5	2469	0	13,9	81	8.7	2689	0	25,6	62
4.4	1204	0	7,8	79	22.5	2175	0	16,9	76	9.7	2674	0	27,4	57
5.4	2150	0	10,7	64	23.5	1942	1,2	15,7	81	10.7	2141	10,8	24,7	76
6.4	1874	0	13,3	60	24.5	2508	0	11,6	70	11.7	2402	5,8	23,1	82
7.4	1006	1,9	9,5	83	25.5	1800	0	9,5	71	12.7	2399	0	21,5	72
8.4	1304	0	8,5	81	26.5	1615	0	11,8	73	13.7	2483	5	24,2	67
9.4	1301	0	6,2	83	27.5	2520	0,2	12,6	68	14.7	2492	0	19,9	70
10.4	993	0	5,9	86	28.5	2223	0	13,1	62	15.7	2688	5,5	21,4	64
11.4	2039	0	8,9	71	29.5	1247	12,1	13,2	90	16.7	2033	0,3	18,0	81
12.4	2061	0	8,6	74	30.5	1187	0,4	12,4	93	17.7	2567	0	17,6	70
13.4	1844	0	8,7	72	31.5	2207	0	14,7	71	18.7	2900	0	20,8	62
14.4	2196	0	8,2	65	1.6	2109	0	14,3	74	19.7	2745	0	23,1	54
15.4	1542	0	6,7	76	2.6	3019	0	15,1	68	20.7	2154	2,4	23,5	64
16.4	2331	0	8,0	70	3.6	3022	0	15,0	72	21.7	1353	0	19,9	75
17.4	2353	0	10,6	68	4.6	2861	0	15,2	74	22.7	2194	1,3	18,6	78
18.4	2202	0	6,9	72	5.6	2170	1,3	19,4	69	23.7	1991	0	15,4	71
19.4	1144	0,5	6,9	73	6.6	1111	0,3	14,5	92	24.7	2308	0	16,3	69
20.4	1849	0	6,0	67	7.6	1883	13,9	16,3	85	25.7	1053	4	16,4	91
21.4	1846	0	5,8	71	8.6	1126	2,6	17,0	95	26.7	1691	0	18,3	80
22.4	2474	0	7,2	65	9.6	1570	2,3	19,7	89	27.7	1280	25,4	17,2	91
23.4	2296	0	11,0	61	10.6	1634	2,3	18,4	89	28.7	1386	7,4	15,3	90
24.4	2176	0	15,8	51	11.6	2370	0	14,4	80	29.7	2267	0	16,9	76
25.4	1051	6,6	12,4	86	12.6	1446	0	13,6	73	30.7	1070	0,3	18,4	75
26.4	1270	0	12,3	79	13.6	1852	0	15,1	73	31.7	1189	0,1	20,0	79
27.4	2237	0	14,8	65	14.6	2614	0	12,3	73	1.8	1025	1,1	16,8	90
28.4	1900	0	19,1	53	15.6	2995	0	15,2	73	2.8	1997	3,3	16,5	87
29.4	1097	3,7	12,3	88	16.6	3072	0	16,3	72	3.8	1163	1,6	15,9	90
30.4	1436	3	9,6	91	17.6	1385	0,9	12,4	84	4.8	1425	0,3	16,5	84
1.5	1179	4,6	8,8	87	18.6	1411	3,5	10,7	87	5.8	2306	0	16,9	74
2.5	980	0	8,1	94	19.6	1195	0	11,4	84	6.8	2008	1,5	17,7	78
3.5	1923	0	7,1	77	20.6	1462	0	12,5	80	7.8	1167	0,1	18,6	89
4.5	1761	0	7,3	79	21.6	2908	0	14,0	70	8.8	1138	0,4	17,5	88
5.5	1150	4,3	7,4	80	22.6	2997	0	17,7	66	9.8	1951	1	19,1	78
6.5	949	4,3	6,5	98	23.6	2514	0	20,3	66	10.8	1571	0,4	18,4	81
7.5	953	0,3	8,5	94	24.6	2602	0	18,1	70	11.8	2187	0	17,3	74
8.5	994	0,1	8,0	91	25.6	2931	0	16,5	74	12.8	1917	0	16,5	75
9.5	1095	0	6,3	77	26.6	3057	0	20,0	65	13.8	1802	0	18,1	78
10.5	1441	1,9	7,1	79	27.6	2790	0	23,1	61	14.8	1022	11,3	18,7	83
11.5	969	10,7	6,7	98	28.6	2560	0	21,2	69	15.8	910	0,3	16,7	94
12.5	1058	0,2	7,1	94	29.6	1469	0	17,7	83	16.8	1129	6,6	15,7	94
13.5	1246	0	7,7	82	30.6	2405	0	22,6	63	17.8	1100	7,9	15,8	94
14.5	1017	0	9,1	77	1.7	2441	0	26,3	56	18.8	1564	0,1	15,7	84
15.5	2166	0	11,4	70	2.7	2465	2,9	24,6	69	19.8	1990	0	19,8	75
16.5	1678	0	10,6	77	3.7	2146	0	21,7	75	20.8	1607	0	20,7	83
17.5	1942	0	9,3	79	4.7	1638	0	17,8	76	21.8	1017	0,4	20,2	86
18.5	1538	0	11,4	67	5.7	2218	0	15,8	74	22.8	1116	9,1	19,0	89

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Fortsetzung Tagesklimawerte Werlte, Jahr 2010

Datum	R	N	T	LF	Datum	R	N	T	LF	Datum	R	N	T	LF
23.8	1618	7,6	16,1	76	24.8	1298	0,3	15,5	86	25.8	831	14,7	14,1	99
26.8	825	27,7	13,3	98	7.9	750	2,8	13,9	89	19.9	700	2,3	13,6	94
27.8	1664	1,2	12,9	89	8.9	864	0	15,1	93	20.9	1185	0	14,5	92
28.8	1143	15,2	12,2	95	9.9	824	1,6	14,9	95	21.9	1675	0,1	14,7	88
29.8	1284	5,3	11,6	91	10.9	1475	0,3	17,3	87	22.9	1510	0	16,1	88
30.8	1603	0	13,8	84	11.9	756	10,3	14,8	98	23.9	641	5,1	14,8	98
31.8	1065	0	13,6	88	12.9	1038	0,3	14,2	87	24.9	1526	0	11,4	83
1.9	890	3,7	13,1	94	13.9	710	18,5	14,8	100	25.9	626	1,2	7,8	99
2.9	805	0,7	13,3	95	14.9	1593	7,2	13,2	83	26.9	619	12,7	11,5	100
3.9	1911	0,3	13,4	81	15.9	1076	8,2	11,3	93	27.9	720	0,2	11,0	94
4.9	1977	0	12,3	82	16.9	1371	1,9	11,6	87	28.9	1123	0	7,8	89
5.9	2153	0	13,1	73	17.9	1006	4,3	10,0	93	29.9	967	0,1	9,4	89
6.9	867	0	13,7	71	18.9	811	1,8	10,8	94	30.9	871	0,4	10,8	96

R = Strahlung [J/cm²] ; N = Niederschlag [mm] ; T = Temperatur [°C] ; LF = Luftfeuchte [% rel.]

Akademischer Werdegang

2002 – 2007	<i>Universität Hamburg, Universität Göttingen</i>	Hamburg/Göttingen
	Studium der Geografie mit den Nebenfächern Geologie, Soziologie und Naturschutz	
2008 – 2009	Mitarbeiter beim <i>LBEG Hannover</i> im Forschungsprojekt Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen, Beginn der Forschungsarbeit zum Thema Pflanzenmodellierung	Hannover
2009 – heute	Mitarbeiter an der <i>Uni Göttingen</i> im Forschungsprojekt „Bioenergie im Spannungsfeld“ (Laufzeit 2009 – 2014), Entwicklung des Pflanzenmodells BioSTAR als Kernthema der Promotion	Göttingen