DEMETER/TRITSIM
Autoren: E. Matthäus et al.

1 Überblick

Das Modellsystem DEMETER (*Matthäus et al.*, 1992) umfaßt als Kernmodell das Winterweizenmodell TRITSIM (*Matthäus et al.*, 1986) neben dem Bodenmodell BAMO (*Kartschall et al.*, 1989) und dem Wurzelmodell ROOTMOD (*Asseng*, 1989). Es wurde unter der Entwicklungsumgebung SONCHES (Simulation of Nonlinear Complex Hierarchic Ecosystems) entwickelt. Der Anwendungsschwerpunkt liegt in der landwirtschaftlichen und ökologischen Forschung.

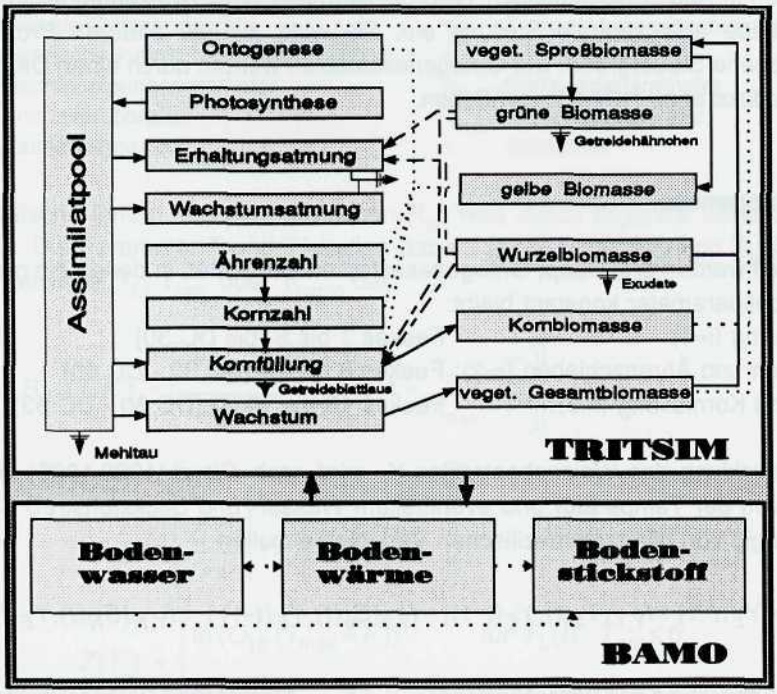

Abb. 1: Gesamtmodell DEMETER
---- Masseflüsse, - - - Biomasseumlagerungen, ... Informationsflüsse

2 Bodenwasser, Bodenwärme und Bodenstickstoff

Die Wasser-, Wärme- und Stickstoffdynamik des Bodens wird durch das Bodenmodell BAMO in Kopplung mit den übrigen Simulationsmodulen simuliert. Die Beschreibung dieses Modells ist in der Dokumentation der Modelle BAMO und BAMO2 enthalten.

3 Pflanze

3.1 Gesamtmodell

Das Modell TRITSIM beschreibt in Tagesschritten (Unterteilung in tägliche Licht- und Dunkelperiode) die Ontogenese, Ertragsbildung und das Wachstum eines Winterweizenbestandes unter Feldbedingungen für die Zeitspanne der Nachwinterbestockung bis zur Ernte. Alle Massebilanzierungen werden über den Kohlenstoff realisiert, wobei durch ontogeneseabhängige C-Biomasse-Äquivalente für Wurzel, Sproß und Korn der Bezug zur Trockenmasse gewährleistet ist. Es werden außerdem Wechselwirkungen zwischen den Pflanzen und den Schädlingen Getreideblattlaus und Getreidehähnchen sowie der Krankheit Mehltau simuliert.
Unter den in Abb. 1 dargestellten Teilprozessen des Winterweizenmodells nimmt die Ontogenese eine zentrale Stellung ein. Sie wirkt auf die anderen Prozesse als zeitbezogene Steuergröße. Die Ontogenesestadien werden durch einen Dezimalcode nach *Zadoks et al.* (1974) beschrieben.

3.2 Ontogenese

Im Modell werden drei Haupt-Ontogenesestadien betrachtet, in denen ein großer Teil der Modellparameter konstant bleibt:

Bestockung (i=1):	Feekes 1 bis 6 (bis DC 30)
Schossen und Ährenschieben (i=2):	Feekes 6 bis 16 (DC 30 - DC 60)
Blüte und Kornfüllung (i=3):	Feekes 16 bis 19/20 (DC 60 - DC 93).

Die Entwicklung des Weizenbestandes Y_E wird nach *Claus* (1982,1986) in Abhängigkeit von der Temperatur und eventuellem Wasser- und Stickstoffstreß ($f_{Y,\theta}$, $f_{Y,N}$) unabhängig von pflanzenspezifischen Variablen simuliert:

$$Y_E(t) = Y_E(t-1) + f_{Y,T}(T_L(t), Y_E(t-1)) + f_{Y,\theta}(S_\theta(t), Y_E(t-1)) + f_{Y,N}(S_N(t), Y_E(t-1)) \quad (1)$$

Y_E	Entwicklung des Weizenbestandes	$f_{Y,\theta}$	Trockenstreß-Responsfunktion (Gl. (7))
T_L	mittlere Temperatur der Lichtperiode	S_θ	Trockenstreß (Gl. (39))
S_N	Stickstoffstreß	$f_{Y,N}$	N-Streß-Responsfunktion (Gl. (7))
t	Zeitschritt		

Der Stickstoff-Streßfaktor S_N wird in Abhängigkeit von der unterirdischen Biomasse, dem N-Gehalt in der unterirdischen Biomasse und einem entwicklungsabhängigen Stickstoffstreß-Schwellenwert berechnet.

Die Abhängigkeit der Ontogenese von der mittleren Temperatur während der Lichtperiode $f_{Y,T}$ wird wie folgt berechnet:

$$f_{Y,T} = \sum_{i=1}^{3} k_{Y,i}\, r_{Y,i}(T_L(t))\; Y_i^{o_{acc,i}} \exp\left[\frac{o_{acc,i}}{o_{sat,i}}\left(1 - Y_i^{o_{sat,i}}\right)\right] \tag{2}$$

mit

$$r_{Y,i} = \begin{cases} 0 & T(t) \notin (T_{\min}, T_{\max}) \\ \dfrac{R_{ph}(T_L, T_{opt}) - R_{ph}(T_{\min}, T_{opt})}{1 - R_{ph}(T_{\min}, T_{opt})} & T_{\min} \le T(t) < T_{opt} \\ R_{ph}(T_L, T_{opt}) & T_{opt} \le T_L(t) \le T_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

T_L	mittlere Temperatur der Lichtperiode	i	Ontogenesestadium
$k_{Y,i}$	optimale Ontogeneserate	$r_{Y,i}$	Temperaturresponsfunktion
R_{ph}	spezifische innere Temperaturfunktion	r_{FAC}	Korrekturfaktor
o_{ACC}	Beschleunigungsparameter	o_{SAT}	Sättigungsparameter
T_{min}	Minimaltemperatur	T_{max}	Maximaltemperatur
T_{opt}	Optimaltemperatur	t	Zeitschritt

Die spezifische innere Temperaturfunktion R_{ph} wird durch folgende Gleichung beschrieben. Die Parameter T und T´ stellen dabei - je nach Stellung von $R_{ph}(T,T')$ in Gl. (3) - entweder T_L, T_{opt}, oder T_{mmin} dar.

$$R_{ph}(T, T') = \left[\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T'}\right]^{\alpha} \exp\left[\alpha\left(1 - \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T'}\right)\right] \tag{4}$$

$$\alpha = \left[\frac{Z(T')}{r_{FAC}}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{2\, r_{FAC}}{Z}}\right)\right]^2 \tag{5}$$

$$Z(T') = \begin{cases} \ln\left(Q_{10}^{l}\,(T_{\max} - T')\right) & \text{für } T_L(t) - T_{opt} \le 0 \\ \ln\left(Q_{10}^{u}\,(T_{\max} - T')\right) & \text{für } T_L(t) - T_{opt} > 0 \end{cases} \tag{6}$$

T_L	mittlere Temperatur der Lichtperiode	r_{FAC}	Korrekturfaktor
Q_{10}^{l}	Q_{10}-Wert im unteroptimalen Bereich	T_{opt}	Optimaltemperatur
Q_{10}^{u}	Q_{10}-Wert im überoptimalen Bereich	T_{max}	Maximaltemperatur
t	Zeitschritt		

Die Beschleunigung der Ontogenese bei Trockenheit und/oder Stickstoffmangel wird durch die Ratenfunktionen $f_{Y,\theta}$ und $f_{Y,N}$ beschrieben:

$$f_{Y,\theta/N} = \begin{cases} 0 & \text{für } Y_E(t-1) \geq Y_s \\ k_{Y,\theta/N}[1 - S_{\theta/N}(t)]\, k_{Y,i} & \text{für } Y_E(t-1) < Y_s \end{cases} \quad (7)$$

$k_{Y,\theta/N}$	Rate der Entwicklungsbeschleunigung bei Wasser- oder Feuchtestreß	S_θ	Trockenstreß (Gl. (39))
		S_N	Stickstoffstreß
$k_{Y,i}$	optimale Ontogeneserate	Y_s	Grenze für Wasser- oder N-Effekt
Y_E	Entwicklung des Weizenbestandes		

3.3 Photosynthese und Assimilation

Im Gegensatz zu vielen anderen Pflanzenmodellen (LAI als Hauptparameter) basiert die Berechnung der Photosynthese in TRITSIM auf der maximalen Photosyntheserate pro gesamter grüner Biomasse. Die Assimilationsmenge eines Tages wird im Modell als Summe von Einzelraten dargestellt:

$$\Delta A(t) = r_Q(t)\, r_T(t)\, r_B(t)\, r_\theta(t)\, r_N(t)\, r_H(t)\, r_G(t)\, \tau_L(t) \quad (8)$$

r_Q	Strahlungsterm	r_T	Term der Phototemperatur
r_B	Beitrag der oberirdischen Biomasse	τ_L	Länge der täglichen Photoperiode
$r_{\theta/N}$	Einfluß von Wasser- bzw. N-Streß	r_G	Reduktion durch Getreidehähnchen
r_H	Reduktion durch Blattläuse.		

Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung dieser Terme ist in *Matthäus et al.* (1992) enthalten.
Die täglich gebildeten Assimilate werden unter Bezugnahme auf *Thornley* (1977) in einen Assimilatpool eingespeist $A(t) = A(t-1) + \Delta A(t)$.

3.4 Assimilatverteilung

3.4.1 Prinzip der Verteilung

Der Assimilatpool wird täglich bis zu einer, von der grünen Biomasse abhängigen, unteren Ausschöpfungsschwelle durch die assimilatverbrauchenden Prozesse wieder entleert.

Hierarchie:
1. Erhaltungsatmung (Tag)
2. Wachstumsatmung (Tag)
3. Wachstum der Biomasse (Tag)
4. Erhaltungsatmung (Nacht)
5. Wachstumsatmung (Nacht)
6. Wachstum der Biomasse (Nacht)
7. Kornfüllung (ab DC 61, $Y_E \geq 16$)

Reichen die täglichen Vorräte zur Abdeckung der Erhaltungsatmung und der Kornfüllung nicht aus, werden nach dem Prinzip des geringsten Energieaufwandes Umverteilungen aus der grünen bzw. der Wurzelbiomasse simuliert.

3.4.2 Erhaltungsatmung

Der Assimilatverbrauch durch die Erhaltungsatmung am Tag berechnet sich zu

$$R_{M,L}(t) = r_{M,L}(t) - J_{M,L}(t) \tag{9}$$

mit

$$r_{M,L}(t) = \eta_{M,L}[m_{GB}(t-1) + m_{RB}(t-1)]\, Q_{10,L}^{0.1\,(T_L(t)-T_M)}\, \tau_L(t) \tag{10}$$

$$J_{M,L}(t) = \min\big(\max[0,\, r_{M,L}(t) - A(t) + \xi_{GB,M}\, m_{GB}(t-1)],\, m_{GB}(t-1) + m_{RB}(t-1)\big) \tag{11}$$

$R_{M,L}$	Assimilatverbrauch durch die Erhaltungsatmung am Tag	$\eta_{M,L}$	Biomasseäquivalent der Erhaltungsatmung
$r_{M,L}$	Veratmungsbedarf	$J_{M,L}$	möglicher Umverteilungsfluß
m_{GB}	grüne Biomasse	m_{RB}	Wurzelbiomasse
$Q_{10,L}$	Beschleunigungsfaktor	T_M	Basis für Temperaturabhängigkeit
$\xi_{GB,M}$	Assimilatdichte	A	Assimilatpool
τ_L	Länge der tägl. Photoperiode	t	Zeitschritt

Unter der Assimilatdichte $\xi_{GB,M}$ ist die relative Dichte der im Photosyntheseapparat fixierten Assimilate, die nicht für die Erhaltungsatmung (Tag und Nacht) und die Wachstumsatmung während der Nacht verfügbar sind, zu verstehen.

Der Assimilatpool verringert sich durch die Erhaltungsatmung in der Lichtperiode zu

$$A(t) = A(t) - \min[R_{M,L}(t),\, A(t) - \xi_{GB,M}\, m_{GB}(t-1)]. \tag{12}$$

A	Assimilatpool
$R_{M,L}$	Assimilatverbrauch durch die Erhaltungsatmung am Tag
m_{GB}	grüne Biomasse
$\xi_{GB,M}$	Assimilatdichte
t	Zeitschritt

Der Assimilatbedarf für die Erhaltungsatmung in der Dunkelperiode $R_{M,D}$ wird anolog bestimmt.

3.4.3 Wachstumsatmung

Die Wachstumsatmung in der Lichtperiode hat folgenden Assimilatbedarf:

$$R_{G,L}(t) = \min[\, r_{G,L}(t),\, A(t) - \xi_{GB,G}\, m_{GB}(t-1)] \tag{13}$$

$$r_{G,L}(t) = \tau_L(t)\, Q_{10,GL}^{0.1\,(T_L(t)-T_G)} \max\{0,\, \eta_{GB,L}[A(t) - \xi_{GB,G}\, m_{GB}(t-1)]\} \tag{14}$$

$R_{G,L}$	Assimilatbedarf der Wachstumsatmung	A	Assimilatpool
τ_L	Länge der tägl. Photoperiode	$\xi_{GB,G}$	Assimilatdichte
m_{GB}	grüne Biomasse	$Q_{10,GL}$	Beschleunigungsfaktor
T_L	mittlere Temperatur der Lichtperiode	$\eta_{GB,L}$	Biomasseäquivalent der Wachstumsatmung
T_G	Basis für Temperaturabhängigkeit		
t	Zeitschritt		

Die Assimilatdichte $\xi_{GB,G}$ ist in diesem Fall die relative Dichte der nicht für die Wachstumsatmung am Tag verfügbaren, im Photosyntheseapparat fixierten Assimilate. Im Anschluß wird die Verringerung des Assimilatpools durch die Wachstumsatmung berechnet:

$$A(t) = A(t) - R_{G,L}(t) \tag{15}$$

Die Simulation der Wachstumsatmung in der Nacht erfolgt bei Verwendung des entsprechenden Koeffizientensatzes analog.

3.4.4 Wachstum

Auf der Basis der Atmung für das Biomassewachstum im hellen Tagesabschnitt $R_{G,L}$ wird der Materialfluß vom Assimilatpool zu den Pflanzenorganen simuliert:

$$A(t) = A(t) - \Delta m_{GT,L}(t) \tag{16}$$

$$\Delta m_{GT,L}(t) = R_{G,L}(t)\, \frac{1-\eta_{GB,L}}{\eta_{GB,L}} \tag{17}$$

A	Assimilatpool
$\Delta m_{GT,L}$	partieller Biomassezuwachs in der Lichtperiode
$R_{G,L}$	Assimilatverbrauch durch Wachstumsatmung
$\eta_{GB,L}$	Biomasseäquivalent der Wachstumsatmung
t	Zeitschritt

Der Biomassezuwachs in der Nacht $\Delta m_{GT,D}$ wird anolog auf der Grundlage der Wachstumsatmung in der Nacht berechnet. Die gesamte Biomassewachstumsrate eines Tages Δm_{GT} ergibt sich aus der Summe der beiden partiellen Größen $\Delta m_{GT,L}$ und $\Delta m_{GT,D}$.

Wenn die im Assimilatpool gespeicherten Assimilate nicht für die Aufrechterhaltung der Erhaltungsatmung ausreichen, kann ein Anteil aus der grünen und der Wurzelbiomasse umverlagert werden. Diese Umverlagerungsflüsse werden mit Gl. (18) berechnet:

$$J_{\alpha,\beta}(t) = J_{M,\beta}(t)\,\frac{m_{\alpha}(t-1)}{m_{GB}(t-1)+m_{RB}(t-1)} \tag{18}$$

m_{GB} grüne Biomasse
m_{RB} Wurzelbiomasse
$J_{M,\beta}$ möglicher Umverteilungsfluß (Gl. (11))
t Zeitschritt

Der Index α in Gl. (18) ist entweder GB für die Umverteilung aus der grünen Biomasse oder RB für die Umverteilung aus der Wurzelbiomasse. Der Index β charakterisiert die Lichtperiode (β = L am Tag bzw. β = D in der Dunkelperiode).

3.5 Biomassewachstum und Reduktion

3.5.1 Kornfüllung

Während der generativen Phase ($Y_E \geq 16$) ist die Kornfüllung der dominierende Prozeß gegenüber dem Wachstum der Wurzel- und der grünen Biomasse. Die Kornfüllungsrate ist abhängig von den täglich verfügbaren Assimilaten, der Ontogenese und der Kornzahl n_G.
Zuerst wird die Kornzahl pro Quadratmeter auf der Grundlage der Ährenzahl und der Wasser- und N-Versorgung berechnet.
Die Zunahme der Ährenzahl Δn_{EA} wird in Abhängigkeit von der Ontogenese, der oberirdischen Biomasse und der Wachstumsrate Δm_{GT} simuliert.

$$\Delta n_{EA} = \begin{cases} r_{EA}\,\Delta m_{GT}'\,k_N & \text{für } Y_{FB} \leq Y_E \leq Y_{FE} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{19}$$

$$r_{EA} = \begin{cases} 0 & \text{für } m_{GB}(t-1)+m_{DB}(t) \geq m_{TH} \\ \left(1-\dfrac{m_{GB}(t-1)+m_{DB}(t)}{m_{TH}}\right)^{x_3} & \text{sonst} \end{cases} \tag{20}$$

Y_E	aktuelles Ontogenesestadium	Y_{FB}	Beginn der Ährenbildung
Y_{FE}	Ende der Ährenbildung	m_{GB}	grüne Biomasse
m_{DB}	tote (gelbe) Biomasse	k_N, m_{TH}, x_3	Parameter

Die Zunahme der Kornzahl ergibt sich dann mit:

$$\Delta n_G(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } Y_E \geq Y_{of} \text{ und } \Delta n_G + n_G(t-1) > n_G(t-1) \\ \Delta n_{EA}(t)\, n_{G,opt}\, f_{G,\theta}\, f_{G,N} & \text{sonst} \end{cases} \tag{21}$$

$f_{G,\theta}$	Einfluß von Feuchteangebot	$f_{G,N}$	Einfluß von Stickstoffangebot
$n_{G,opt}$	Kornzahl unter optimalen Bedingungen	n_G	Kornzahl
Y_{of}	Ende der Kornzahlreduktion durch Trockenheit oder Stickstoffstreß	t	Zeitschritt

Das Anwachsen der Kornmasse wird als Summe der einzelnen Flüsse zur Kornfüllung dargestellt. Dazu wird zuerst die potentielle Kornfüllung berechnet:

$$\Delta m_g^{pot} = \begin{cases} 0 & \text{für } Y \notin [Y_G, Y_M) \\ k_G\, n_G\, Y_{E,norm}^{x_4} \exp\left[\frac{x_4}{x_5}(1 - Y_{E,norm}^{x_4})\right] & \text{sonst} \end{cases} \tag{22}$$

Δm_g^{pot}	potentielle Kornfüllung	k_G	maximale Kornfüllungsrate
x_4	Beschleunigungskoeffizient	n_G	Kornzahl
x_5	Sättigungsexponent	Y_G	Beginn der Kornfüllung
$Y_{E,norm}$	normierte Ontogenese	Y_M	Ende der Kornfüllung

Wenn die potentielle Kornfüllungsrate die totale Wachstumsrate der Biomasse übersteigt, kommt es zu einer Umverlagerung weiterer Kornfüllungsreserven und einem Wachstumsstop der vegetativen Biomasse. Umverlagerungen sind primär aus dem Assimilatpool ($J_{G,A}$) und an zweiter Stelle aus der grünen Biomasse ($J_{G,GB}$) möglich:

$$J_{G,A} = \min\left[A(t) - \xi_{GB,M}\, m_{GB}(t-1),\ \max(0, \Delta m_G^{pot} - \Delta m_{GT})\right] \tag{23}$$

$$J_{G,GB} = \min\left[m_{GB}(t-1),\ \max(0, \Delta m_G^{pot} - J_{G,GT}\, J_{G,A})\right] \tag{24}$$

$$J_{G,GT} = \min(\Delta m_G^{pot}, \Delta m_{GT}) \tag{25}$$

$J_{G,A}$	Fluß aus dem Assimilatpool	$J_{G,GB}$	Fluß aus der grünen Biomasse
$J_{G,GT}$	Umverlagerungsfluß aus dem Gesamtbiomassewachstum	Δm_g^{pot}	potentielle Kornfüllung
		A	Assimilatpool
Δm_{GT}	partieller Biomassezuwachs	m_{GB}	grüne Biomasse
$\xi_{GB,M}$	Assimilatdichte		

Die Umverlagerung aus der grünen Biomasse verstärkt ein Absterben dieser und beschleunigt den Alterungsprozeß.

3.5.2 Wachstum und Reduzierung der vegetativen Biomasse

3.5.2.1 Wachstum und Alterung der grünen Biomasse

Die nutzbaren Ressourcen für das Wachstum der vegetativen Biomasse ergeben sich aus der Differenz zwischen dem totalen Biomassewachstum Δm_{GT} und dem für die Kornfüllung verwendeten Anteil $J_{G,GT}$:

$$\Delta m_{GT}^{res} = \max(0, \Delta m_{GT} - J_{G,GT}) \tag{26}$$

Die Änderung der grünen Biomasse ergibt sich bei Berücksichtigung der ontogeneseabhängigen Wurzel-Halm-Rate η_{SR} und der Alterungsrate Δm_{DB} zu:

$$\Delta m_{GB} = \Delta m_{GT}^{res}\, \eta_{SR}(Y_E) - \Delta m_{DB} \,. \tag{27}$$

Die Alterung (Übergang von grüner in gelbe Biomasse) wird im Modell durch die Ontogenese gesteuert und von Wasser-, Stickstoff- und Schädlingsstreß beeinflußt.

$$\Delta m_{DB} = \Delta m_{DB}^{I} + [m_{GB}(t-1) + m_{DB}(t-1)]\; r_{S,H}(t-1) \tag{28}$$

mit

$$\Delta m_{DB}^{I} = \begin{cases} 0 & \text{für } Y_E < Y_{SB} \\ f_{S,\theta}(t)\, f_{S,N}(t)\, k_{S1}\, |m_{GB}(t-1)|^2 & \text{für } Y_E \in [Y_{SB}, Y_{SA}) \\ f_{S,\theta}(t)\, f_{S,N}(t)\, [k_{S2}\, m_{GB}(t-1)\,(Y_E - Y_{SA}) + k_{S1}\, |m_{GB}(t-1)|^2] & \text{für } Y_E \in [Y_{SA}, Y_{SE}] \\ m_{GB}(t-1) & \text{für } Y_E > Y_{SE} \end{cases} \tag{29}$$

Δm_{DB}	Zuwachs der gelben Biomasse	m_{GB}	grüne Biomasse
$r_{S,H}$	Mehltau induzierte Alterungsrate	k_{S1}	Alterungsrate
k_{S2}	ontogeneseabhängige Alterungsrate	$Y_{SB/E}$	Beginn/Ende der Alterung
Y_{SA}	Beginn der beschleunigten Alterung	$f_{S,\theta}$	Einfluß von Feuchtestreß
Y_E	Entwicklungsstadium	$f_{S,N}$	Einfluß von Stickstoffstreß
t	Zeitschritt		

Die Kohlenstoffmenge in der grünen Biomasse am Ende des jeweiligen Zeitschrittes beträgt dann:

$$m_{GB}(t) = m_{GB}(t-1) + \Delta m_{GB}(t) - J_{GB,L}(t) - J_{GB,D}(t) \tag{30}$$

m_{GB}	Kohlenstoffmenge in der grünen Biomasse
Δm_{GB}	Änderung der grünen Biomasse
$J_{GB,L(D)}$	durch die Erhaltungsatmung in der Licht- (Dunkel-) Periode umverlagerte grüne Biomasse
t	Zeitschritt

3.5.3 Wurzeldynamik

Entsprechend der ontogeneseabhängigen Wurzel-Halm-Rate η_{SR} wird die Assimilatanlieferung zu den Wurzeln berechnet:

$$\Delta m_{RB}(t) = [1 - \eta_{SR}(t)]\, \Delta m_{GT}^{res}(t) \tag{31}$$

Δm_{RB}	Assimilatanlieferung zu den Wurzeln
Δm_{GT}^{res}	nutzbare Ressourcen für das Wachstum der grünen und der Wurzelbiomasse
η_{SR}	ontogeneseabhängige Wurzel-Halm-Rate
t	Zeitschritt

Diese, für das Wurzelwachstum pro Zeitschritt verfügbaren, Assimilate werden über die durchwurzelten Bodenschichten entsprechend eines einfachen Ansatzes nach *Asseng* (1989) verteilt:

$$\Delta m_{RB,i}^{(+)} = \left[\Delta m_{RB}(t) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta m_{RB,j}^{(+)}(t)\right] r_{R,\theta}(t)\, r_{R,T}(t) \tag{32}$$

$$\Delta m_{RB}^{(+)} = \sum_{i=1}^{n_{lay}} \Delta m_{RB,i}^{(+)}(t) \tag{33}$$

$\Delta m_{RB,i}^{(+)}$	Wurzelwachstum in der Bodenschicht i
$\Delta m_{RB}^{(+)}$	Gesamtwurzelwachstum
Δm_{RB}	Assimilatanlieferung zu den Wurzeln
$r_{R,\theta/T}$	Feuchte-/Temperatur-Responsfunktion
n_{lay}	Anzahl der durchwurzelten Bodenschichten

Dabei ist ein Wurzelwachstum nur in bereits durchwurzelten Bodenschichten möglich.

Wurzelausscheidungen werden als ontogeneseabhängiger Teil des Assimilat- und Biomassewachstums-Flusses simuliert:

$$\Delta m_{EX}(t) = \sum_{i=1}^{n_{lay}} \Delta m_{EX,i}(t) \tag{34}$$

$$\Delta m_{EX,i}(t) = k_{EX}\, \Delta m_{RB,i}^{(+)}(t) \tag{35}$$

$\Delta m_{EX,i}$	Wurzelausscheidung in der Schicht i
Δm_{EX}	Gesamtbetrag der Wurzelausscheidungen
$\Delta m_{RB,i}^{(+)}$	Wurzelwachstum in der Bodenschicht i
k_{EX}	Wurzelausscheidungsfraktion (ontogeneseabhängig)
n_{lay}	Anzahl der durchwurzelten Bodenschichten
t	Zeitschritt

Die Mortalität der Wurzelteile wird durch eine lineare Abfallfunktion in Abhängigkeit von der Ontogenese simuliert.

$$\Delta m_{RB}^{(-)}(t) = \sum_{i=1}^{n_{lay}} \Delta m_{RB,i}^{(-)}(t) \tag{36}$$

$$\Delta m_{RB,i}^{(-)}(t) = k_{R,M}\, m_{RB,i}^{(-)}(t-1) \tag{37}$$

$\Delta m_{RB}^{(-)}$ Gesamtmortalität der Wurzelbiomasse
$\Delta m_{RB,i}^{(-)}$ Zunahme der toten Wurzelbiomasse in der Bodenschicht i
$k_{R,M}$ Mortalitätsrate
n_{lay} Anzahl der durchwurzelten Bodenschichten

Die Exudate und abgestorbenen Wurzelteile werden bei der Simulation des Bodenstickstoff-Kreislaufes (Modellteil BAMO, *Kartschall,* 1986) als Fraktionen der frischen organischen Substanz berücksichtigt und somit wieder in den Gesamt-N-Kreislauf zurückgeführt.
Die Kohlenstoffmenge in der Wurzelbiomasse am Ende des jeweiligen Zeitschrittes beträgt dann:

$$m_{RB}(t) = m_{RB}(t-1) + \Delta m_{RB}^{(+)}(t) - \Delta m_{RB}^{(-)}(t) - \Delta m_{EX}(t) - J_{RB,L}(t) - J_{RB,D}(t) \tag{38}$$

m_{RB} Kohlenstoffmenge in der Wurzelbiomasse
$\Delta m_{RB}^{(+)}$ Gesamtwurzelwachstum
$\Delta m_{RB}^{(-)}$ Gesamtmortalität der Wurzelbiomasse
Δm_{EX} Gesamtbetrag der Wurzelausscheidungen
$J_{RB,L(D)}$ durch die Erhaltungsatmung in der Licht- (Dunkel-) Periode umverlagerte Wurzelbiomasse

3.6. Wasseraufnahme durch die Pflanze

Die aktuelle Wasserentnahme hängt vom maximalen Transpirationsbedarf der Pflanze und der aktuellen Bodenfeuchte ab. Der maximale Transpirationsbedarf wird vom aktuellen Blattflächenindex LAI bestimmt. Die Berechnung des LAI erfolgt durch Multiplikation der photosynthetisch aktiven Biomasse m_{GB} mit einem Faktor r_{LAI}. Dieser Faktor steigt mit dem Entwicklungsstadium und drückt so die sinkende Rate zwischen der Halm-Biomasse mit ihrem geringen Blattflächenindex im Vergleich zur Blattbiomasse aus.

$$LAI(t) = m_{GB}(t)\, r_{LAI}(t) \tag{39}$$

LAI Blattflächenindex
m_{GB} photosynthetisch aktiven Biomasse
r_{LAI} Verhältnis zwischen m_{GB} und LAI
t Zeitschritt

Die Berechnung des Transpirationsbedarfs erfolgt innerhalb der Bodenfeuchtesimulation. (Siehe dazu die Modelldokumentation BAMO.) Die Wasseraufnahme wird hierarchisch mit der Tiefe berechnet. Deckt der verfügbare Bodenfeuchtegehalt der obersten Schicht den Transpirationsbedarf $D_{max}^{TR}(t)$, so wird nur aus der obersten Schicht entzogen. Ansonsten erfolgt der Entzug auch aus den tieferen Schichten. Deckt der mögliche Entzug UP(t) aus allen durchwurzelten Schichten nicht den Bedarf, so kommt es zu einer Verminderung der Assimilation durch Trockenstreß $S_\theta(t)$:

$$S_\theta(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } S_W(t) < S_{low} \\ \left[\dfrac{S_{up} - S_W(t)}{S_{up} - S_{low}}\right]^\beta & \text{für } S_{low} < S_W(t) < S_{up} \\ 0 & \text{für } S_{up} < S_W(t) \end{cases} \tag{40}$$

mit

$$S_W(t) = 1 - \frac{UP(t)}{D_{max}^{TR}(t)}; \qquad D_{max}^{TR}(t) > 0 \tag{41}$$

UP	aktuelle Wasserentnahme	β	Pflanzen-Bedeckungsindex
D_{max}^{TR}	Transpirationsbedarf	$S_{low/up}$	untere und obere Streßgrenze
t	Zeitschritt		

Beim Auftreten von Trockenstreß kommt es zu einem proportionalen Absinken der Wurzel-Halm-Rate und einer Beschleunigung der Ontogenese.

4 Modellüberprüfung

Das Gesamtmodell DEMETER wurde bisher an folgenden Feldversuchen getestet:

- Statisches Experiment Bad Lauchstädt seit 1902 (Land Sachsen-Anhalt):
  Löß-Standort mit mittlerem Jahresniederschlag von 490 mm,
  Ertragssimulation für den Zeitraum 1957-1990 (in *Matthäus et al.*, 1992)
- Bernburg (Land Sachsen-Anhalt):
  Löß-Standort, Simulation für 1989/90 in *Matthäus et al.* (1992)
- Müncheberg (Land Brandenburg):
  Standort mit lehmigem Sand (Tieflehm-Fahlerde), mittlerem jährlichen Niederschlag von 533 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8.2 °C,
  Simulation für 1982/83 in *Matthäus et al.* (1992)

Die Validierung und Verifizierung des Winterweizenmodells TRITSIM erfolgte auf der Grundlage der Datenbasis des Intensivmeßfeldes in Müncheberg (1980-85) für die Winterweizensorte Alcedo (*Mirschel et al.*, 1987).
Weitere Modellüberprüfungen erfolgten anhand von Düngungsexperimenten in Keszthely (Ungarn) und auf den niederländischen Standorten Bouwing, Eest und PAGV (*Mirschel et al.*, 1991).

5 Ein- und Ausgabedaten

5.1 Eingabedaten

Meteorologie

- Lufttemperatur (mittlere Temperatur während der Photoperiode und mittlere Nachttemperatur)
- Bodenoberflächentemperatur (wenn vorhanden)
- Niederschlag
- Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer
- tägliche Summe der photosynthetisch aktiven Strahlung
- relative Luftfeuchte
- geographische Breite

Boden

- Porenvolumen
- Trockenrohdichte
- Feldkapazität
- Welkepunkt
- Startwerte Bodenfeuchte
- Startwerte N_{min}
- potentiell mineralisierbarer Bodenstickstoff in n Fraktionen

Pflanze

- Aussaattermin
- Erntetermin

Bearbeitung

- Beregnungsmenge und -zeitpunkt
- mineralische Düngung und Düngetermine
- Gesamtmenge und Art organischer Dünger
- Zusammensetzung (C-, N-Anteil)
- Düngetermine

Parameter

- für das Bodenmodell (siehe Dokumentation BAMO)
- Pflanzenparameter
- Parameter für Schaderregermodelle und Mehltaumodell

5.2 Ausgabedaten

- Bodenfeuchte
- Bodentemperatur
- mineralischer Bodenstickstoff
- ausgewaschenes N_{min}
- wirksame Mineralisierungszeit
- Stickstoff im Humus und in der frischen organischen Substanz
- aktueller Entzug durch die Pflanze
- aktuelles Ontogenesestadium
- oberirdische Biomasse
- Wurzelbiomasse
- Kornertrag

6 EDV-technische Umsetzung

Der Quellcode des Bodenmodells ist in FORTRAN 77 geschrieben. Das Modell TRITSIM wurde mit Hilfe des Simulators SONCHES erstellt und liegt in SONCHES-implementierter Form für die Rechner SM 52 und I 102 F vor.

7 Literatur

Asseng, S. (1989): Wurzelwachstumsmodell für Winterweizen. Belegarbeit, Humboldt-Universität Berlin, Sektion Pflanzenbau.

Claus, St. (1982): Ein Beitrag zum Beschreiben der Ontogenese von Getreidepflanzen. In: Unger, K.; Schulz, I. (eds.), Umweltstreß, Martin-Luther-Universität Halle, Wissenschaftliche Beiträge, 35(P 17), 200-206.

Claus, St. (1986): Spezielle Aspekte eines komplexen biophysikalischen Modells der Ertragsbildung von Winterweizenpflanzen. Colloquia Pflanzenphysiologie 10, Humboldt-Universität Berlin, 77-80.

Kartschall, T. (1986): Simulationsmodell der Bodenstickstoffdynamik. Dissertation, AdL der DDR, Berlin, 150 S.

Kartschall, T., P. Döring and F. Suckow (1989): Simulation of nitrogen, water and temperature dynamics in soil. System Analysis Mod. Simulation, 6/2, 117-123.

Matthäus, E., T. Kartschall, C. Frühauf, S. Grossmann and F. Wechsung (1992): The agroecosystem model winter wheat DEMETER. Forschungsbericht Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Matthäus, E., W. Mirschel, H. Kretschmer, K. Künkel and I. Klank (1986): The winter wheat crop model TRITSIM of the agroecosystem AGROSIM-W. Tagungsbericht AdL der DDR, 242, Berlin, 43-74.

Mirschel, W., I. Klank, H. Kretschmer und K. Künkel (1987): Dynamisches Ertragsbildungs- und Entwicklungsmodell TRITSIM für Winterweizen, 2. Mitteilung: Modellvalidierung und -verifizierung. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 31/4, 259-267.

Mirschel, W., H. Kretschmer, I. Klank, E. Matthäus und K. Künkel (1987): Dynamisches Ertragsbildungs- und Entwicklungsmodell TRITSIM für Winterweizen, 1. Mitteilung: Modellbeschreibung. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 31/4, 249-257.

Mirschel, W., H. Kretschmer, E. Matthäus and R. Koitzsch (1991): Simulation of the effects of nitrogen supply on yield formation processes in winter wheat with the model TRITSIM. Fertilizer Research, 27, 293-304.

Mirschel, W., E. Matthäus und H. Kretschmer (1989): Stand und Nutzungsmöglichkeiten des Weizenmodells TRITSIM. Agrarinformatik, 16, 231-246.

Thornley, I.H.M. (1977): Growth, maintance and respiration: a reinterpretation. Ann. Bot., 41, 1191-1203.

Zadoks, J.C., T.T. Chang and C.F. Konzak (1974): Decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research, 14, 415-431.