

Protokoll 8: Strahlungsverteilung und Photosynthese

Bastian Heß, Rebekka Hüfner

06.01.2010

1 Aufgabenstellung

Wie groß ist die Photosynthese eines Kronenbereiches, der homogen mit Nadeln in sphärischer Anordnung gefüllt ist?

Hinweis:

Beschränken sie sich zunächst einmal "schwarze" Blätter (*Lambert Beersches Gesetz*) und berücksichtigen *direkte* und *diffuse Strahlung*, die Photosynthese beschreiben sie mit der *Lichtantwortfunktion* nach *Thornley 1976*. Unterteilen Sie den Kronenraum in Schichten a $0.1m^2$ Blattfläche pro m^2 Grundfläche der Blattflächenindex sei variabel m^2 / m^2

Analyse:

Verändern Sie den Inklinationswinkel der Sonne über die Makrovariable *beta* und die Strahlungsflussdichten diffuser und direkter Strahlung um folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Auswirkungen hat die Schichtdicke auf die Ergebnisse der Simulation?
- Wie groß ist die relative PAR-Absorption in Abhängigkeit von LAI und Sonnenwinkel für diffuse und für direkte Strahlung?
- Welche Beziehungen sehen Sie zwischen LAI und Brutto-Photosynthese (GPR)?
- Welche Unterschiede bewirkt die diffuse Strahlung in der Beziehung zwischen GPR und LAI?
- Welche Beziehungen sehen Sie zwischen LAI und Netto-Photosynthese?
- Welche Auswirkungen hätte eine Klumpung von Blattfläche auf die Ergebnisse der Simulationen?
- Was würde sich ändern, wenn die Blätter nicht schwarz wären?
- Fassen Sie die problematischen Vereinfachungen in dem Vorgehen zusammen.

2 Methode der Auswertung

2.1 Einleitung_{Heß}

Pflanzen sind Primärproduzenten, d.h. sie können Biomasse quasi aus dem "Nichts" nämlich aus Luft und Licht produzieren. Eine genauere Kenntniss der physikalischen Prozesse und Einflussfaktoren hinter diesem Vorgang ist für viele aktuelle Fragestellungen wichtig.

Dieses Wissen hilft Modelle zum Wachstum von Pflanzen und Beständen zu erstellen und deren Entwicklung abzuschätzen.

Auch für die aktuelle Diskussion über den Umstieg auf nachwachsende Energien und die CO_2 -Neutralität von Holz sind Aussagen über die "Leistungsfähigkeit" von Wäldern und Plantagen in diesen Bereichen notwendig.

2.2 Theorie Hüfner

Der für die Photosynthese wirksame Bereich der ankommenden Strahlung befindet sich bei Wellenlängen von 400-700 nm. Die in diesem Bereich ankommenden Photonen, die für die Photosynthese absorbiert werden müssen, werden mit der Photonenflussdichte FPAR in $\frac{\mu E}{m^2 s}$ quantifiziert, dabei entspricht ein $\mu E 10^{-6}$ mol Photonen.

Die Photosyntheseaktivität hat ein Minimum im Bereich von 550nm, also im grünen Bereich.

Die Lichtantwortfunktion nach Thornley (1976) beschreibt das Sättigungsverhalten der *Bruttophotosynthese* GPR in Abhängigkeit von der *Photonenflussdichte* I mit einer nicht rechtwinkligen Hyperbel:

$$(Gl.1) \quad \frac{(\alpha \cdot I + P_{max}) - \sqrt{(\alpha \cdot I + P_{max})^2 - 4\alpha \cdot I \cdot P_{max} \cdot \theta}}{2\theta}$$

a: Lichtausnutzungseffizienz

Pmax: maximale Photosyntheserate

q: Parameter für die Krümmung der Hyperbel

Um von der *Bruttophotosynthese* GPR auf die *Nettophotosynthese* NPR zu kommen muss der Verlust durch Atmung berücksichtigt werden. Die NPR ergibt sich also aus der GPR abzüglich der Dunkelatmung die hier bei 20°C für Sonnennadeln 1,6 und für Schattennadeln 0,8 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ angesetzt wird.

$$(Gl.2) \quad NPR = GPR - R_d$$

Da ein Bestand aber nicht nur aus einem Blatt, sondern aus vielen Blättern besteht ergibt sich das Problem der Zuordnung der Strahlungsverteilung. Die wichtigsten Blatteigenschaften sind hierbei Reflexion ρ , Transmission τ und Absorption α .

Um praktikable und brauchbare Näherungen zu erhalten nehmen wir 2 Vereinfachungen vor. Zum einen werden wir von isotroper Streuung ausgehen ($\rho = \tau$) und die spezielle Richtungsabhängigkeit dann nur in zwei Richtungen betrachten (1D-Ansatz), bzw. noch stärker vereinfacht die Blätter in erster Näherung als schwarz anzusehen ($\rho = \tau = 0$ und $\alpha = 1$).

Für einen Fichtenbestand geben diese Vereinfachungen eine gute Näherung ab.

Da aber nur die auch tatsächlich auf eine Blattfläche treffende Strahlung absorbiert werden kann muss die Abschwächung des Strahlungsstroms berücksichtigt werden. Mit dem Extinktionskoeffizienten k wird berechnet welcher Anteil der Blattoberfläche tatsächlich von der Strahlung getroffen wird. Dabei wird die Projektionsfläche A_p ins Verhältnis zur Blattfläche A gesetzt.

$$(Gl.3) \quad k = \frac{A_p}{A}$$

Da wir von schwarzen Blättern ausgegangen sind kann die Strahlungsabschwächung in einer Schicht als proportional zu A_p betrachtet werden und somit durch:

$$(Gl. 4) \quad \frac{dI}{dL} = -k \cdot I_L$$

errechnet werden wie stark die Photonenflußdichte des Strahlungsstroms I in der durchstrahlten Schicht abgeschwächt wird.

I Photonenflussdichte

L dem Blattflächenindex der durchstrahlten Schicht

Das Lambert-Beer'sche Gesetz der Strahlungsextinktion ist die über die Blattfläche vieler dünner Blattschichten integrierte Form der Differenzialgleichung (Gl. 4) und

$$(Gl.5) \quad I_L = I_0 \cdot e^{-k \cdot L}$$

I_L beschreibt die Intensität an einem Punkt in einem homogenen Medium, nachdem eine (kumulative) Blattfläche L durchstrahlt wurde

I_0 ist die Photonenflussdichte vor Eintritt der Strahlung in das Medium.

Wir gehen von einer Gleichverteilung von Blättern mit azimuthaler und horizontaler Blattstellung aus und können somit weiter vereinfachen und von einer sphärischen Kugeloberfläche ausgehen. Diese Kugeloberfläche und der Einfallswinkel der Sonne lassen uns die jeweilig passenden Extinktionskoeffizienten über die von der Kugel projizierte Fläche A_h/A bestimmen.

Es werden 3 verschiedene Szenarien betrachtet, bei denen die Parameter

Inklinationswinkel der Sonne

direkte PAR-Flussdichte

diffuse PAR-Flussdichte

verändert werden um ihre Auswirkungen auf die Photosyntheserate untersuchen zu können.

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Szenario 1 | Inklinationswinkel der Sonne in Grad | 20 |
| | Direkte PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 100 |
| | Diffuse PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 100 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Szenario 2 | Inklinationswinkel der Sonne in Grad | 51 |
| | Direkte PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 100 |
| | Diffuse PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 100 |

| | | |
|-------------------|---|------|
| Szenario 3 | Inklinationswinkel der Sonne in Grad | 51 |
| | Direkte PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 1400 |
| | Diffuse PAR-Flussdichte in $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ | 200 |

2.3 SAS-Quellcode_{HeK}

```

/*Vorbereitungen:*/
/*Extinktionskoeffizient */
data BEER;
pi = 4*atan(1);
do beta = Pi/12 to Pi/2 by 0.01;
if beta > 0 then K =0.5/sin(beta);
output;
end;
run;
proc insight data = BEER;
line K * beta;run;
data dif; /* Berechne den gemittelten Extinktionskoeffizienten für diffuse Strahlung
= über die Intensitäten aus den Richtungen beta gewichtetes Mittel */
n = 0; /* Anzahl Richtungsklassen */
sk_dif = 0; /* Summe der Extinktionskoeffizienten in der Schleife über die Richtungen
in der letzte Zeile über die Richtungen gemittelter Extinktionskoeffizient */
ssinb = 0; /* Summe des Sinus des Sonnenwinkels beta */

```

```

B_b = -1; /* "negative" */
b_u = 0;
b_s = 2;
pi = 4*atan(1);
I0=100; /* Summe der Strahlungsintensität aus allen Richtungen des oberen Halbraumes in %
*/
dbeta = Pi/100; /* Breite einer Winkelklasse */
DO beta_h = dbeta to Pi/2 by dbeta; /* Integral über alle Vertikalwinkel von 0 - 90 ° */
/* das Integral der Himmelsstrahlung über alle Winkel soll H ergeben:
Annahme uniforme Strahlung, z.B. bei gleichmäßiger Bewölkung. */
beta=beta_h*180/PI; /* Umrechnung von Bogenmaß in Grad */
sinb = sin(beta_h); /* Sinus des Sonnenwinkels = relative Intensität */
I=I0*sinb; /* Strahlungsintensität aus Richtung beta in % */
ssinb + sinb*dbeta; /* Inkrementiere ssinb um sinb*dbeta. x+a; entspricht x = x + a; */
k_b=0.5*(1/sinb); /* Extinktionskoeffizient für direkte Strahlung aus Richtung beta Annahme
sphärische Blattwinkelverteilung */
sk_dif=sk_dif+ k_b*sinb*dbeta ; /* es werden immer 0.5*db addiert da k_b + sinb = 0.5 */
n+1;
*output; /* entkommentieren, wenn die Einzelwerte gewünscht werden. */
end;
k_dif=sk_dif/(ssinb); /* der über die Intensitäten gewichtete Extinktionskoeffizient für diffuse
Strahlung */
/* k_dif2=0.5*n*dbeta/(ssinb); */ /* der nicht über die Intensitäten gewichtete Extinktionsko-
effizient für diffuse Strahlung */
*output;
*drop n;run;
/* Der Extinktionskoeffizient für diffuse uniforme Strahlung ist ca. 0.75 */
/* Macro */

%macro beer_PS(ose,t,lai,beta,F_PAR_b, F_PAR_d);
/*
Oset: Ausgabedatensatz
beta: Sonnenhöhenwinkel in °
FPar_b: direkte PAR-Flussdichte  $\mu\text{E}/(\text{m}^2\text{s})$ 
FPar_d: diffuse PAR-Flussdichte  $\mu\text{E}/(\text{m}^2\text{s})$ 
LAI: Blattflächenindex
*/
DATA &ose;
retain sum_pl;
/* die Photosyntheseraten werden über die verschiedene Blattwinkelklassen einer Schicht auf-
summiert */
retain sum_NPc 0 sum_Pc 0 sum_RD 0; /* Photosyntheseraten, die kumulativ über die Blat-
tfläche
aller Schichten aufsummiert werden. Initialisierung mit 0 */
/* Konstanten: */
pi = 4*atan(1);
/* Photosyntheseparameter: Leverenz & Jarvis, 1981 Sonnennadeln der Sitkafichte */
theta=0.7;
alpha=0.048;
Rd = 1.6; /* Dunkel-Respiration CO2-Abgabe pro  $\text{m}^2$  Blattfläche */
p_max=12; /* Sättigungswert der Brutto-Photosynthese */
/* Randbedingungen */
Lai=&LAI; /* Blattflächenindex  $\text{m}^2$  proj. Blattfläche /  $\text{m}^2$  Grundfläche */
beta=&beta*pi/180; /* im Bogenmaß Sonneninkinationswinkel bezogen auf die Grundfläche */
sinb = sin(beta);
f_par_b0=&F_PAR_b; /* direkte Einstrahlung außerhalb des Kronenraumes b für "beam" */

```

```

f_par_d0=&F_PAR_d; /* diffuse Einstrahlung außerhalb des Kronenraumes */
fl=0.5; /* Blattflaeche pro Schicht in m^2 */
/*Extinktionskoeffizient für diffuse Strahlung */
k_d = 0.75;
/*Extinktionskoeffizient für direkte Strahlung */
k_b = 0.5*(1/sinb);
/* Schleife über (LAI-1)/fl Kronenschichten */
DO L=fl/2 TO (lai-fl) BY fl; /* L ist die kumulative Blattfläche über der betrachteten Schicht
*/
/* Lambert Beer'sches Gesetz:
F_par ist die über die Grundfläche gemittelte PAR
nach Passage einer einer kumulativen Blattfläche von L.
Die Extinktion (=exp(-0.5*(1/sin(beta))*l))
sagt uns, dass die Schattenfläche im Vergleich zur
Grundfläche entsprechend mit zunehmendem L größer wird.
F_par ist tatsächlich ein Mittelwert, dem Modell zufolge
ist es aber so, dass wir in einem Teil des Querschnittes
totalen Schatten haben und in dem Rest die volle
Sonneneinstrahlung. Dies ist wichtig zu unterscheiden, wenn die Photosynthese
berechnet werden soll, da diese nicht-linear von der Strahlung abhängt.*/
/* Diffuse Strahlung */
F_PAR_d= f_par_d0*exp(-k_d*l);/* Diffuse Strahlung Annahme uniform overcast sky */
/* Brutto-Photosynthese der Blätter, die nur diffuse Strahlung erhalten */
a=f_par_d*alpha+p_max; /* Hilfsvariable */
gpr_d=(a-sqrt(a**2-4*f_par_d*alpha*p_max*ttheta))/(2*ttheta); /*µmol CO2/(m^2s)*/
f_par_b=f_par_b0 * exp(-k_b*l);/* gemittelte direkte PAR-Flussdichte µE/(m^2s)*/
f_b=fl*exp(-k_b*l); /* Blattfläche einer Schicht, die direkt bestrahlt ist */
/* Initialisierung der Summenvariablen für die Schleife über die Blattwinkel */
sum_pl=0;
/* Schleife über die Blattwinkel (beta_l), da die Intensität der Strahlung von beta_l abhängt,
mit dem sie auf die Blätter auftrifft. Es gilt: F_par = F_par0 * sin(beta_l) */
DO beta_l = Pi/80 to Pi/2 by Pi/40 ;
/* direkte Strahlung Photonenflussdichte in der Winkelklasse */
sin_delta= sin(abs(beta_l-beta));/* Sinus des Winkels zwischen Strahlung und Blattoberfläche*/
f_par=f_par_b0*sin_delta+ F_PAR_d; /* PAR-Flussdichte auf dem Blatt */
/* Lichtantwortfunktion: Nicht rechtwinklge Hyperbel, Thornley, 1976 */
a=f_par*alpha+p_max; /* Hilfsvariable */
gpr_b=(a-sqrt(a**2-4*f_par*alpha*p_max*ttheta))/(2*ttheta); /*Brutto-Photosynthese pro m**2
Blattfläche */
/* Berechnung der Photosynthese pro Schicht und Winkelklasse */
GPR_b=GPR_B*f_b/20;
/*Brutto-Photosyn. pro 1/20 bestrahlter Fläche :1/20 wg. 20 Winkelklassen mit je 1/20 der
Blattfläche
der sonnenbeschieneenen Blätter */
sum_pl=sum_pl+GPR_b;
end;
/* Raten für die jeweilige Schicht */
GPR_B = sum_pl;/* Bruttphotosynthese der sonnenbeschieneenen Blätter */
GPR_d=GPR_d*FL*(1-f_b/FL);/* Bruttphotosynthese der beschatteten Blätter */
GPR = GPR_b + GPR_d; /* Bruttphotosynthese */
F_Par=F_PAR_b + F_PAR_d; /* PAR-Flussdichte */
NPR = GPR - Rd * FL;/* Nettophotosynthese, Blätter betreiben mit unterschiedlicher Rate
Photosynthese,
alle Blätter der Schicht atmen mit der selben Rate. */
RDr=-RD*FL; /* Dunkelatmung */
/* kumulative Raten bis zur Schicht*/

```

```

sum_GPR + GPR;
sum_NPR + NPR;
sum_RD + (-RD*FL);
OUTPUT;
END;
drop pi a sum_pl beta_l sin_delta ;run;

%mend;
/* beer_PS(oset,lai,beta,F_PAR_b, F_PAR_d);*/
%beer_PS(beer_PS,10,20,100,100);
symbol1 i = join v=none c = green;
symbol2 i = join v=none c = cyan;
symbol3 i = join v=none c = blue;
proc gplot data=beer_PS;
plot (GPR NPR Rdr)*1/overlay vref=0 legend;
plot (GPR GPR_b GPR_d) *1/overlay legend;
plot (F_PAR F_par_b F_PAR_d) * 1/overlay legend;
plot (sum_GPR sum_NPR sum_RD) * 1/overlay legend;
run;quit;

%beer_PS(beer_PS,10,51,100,100);
proc insight data=beer_PS;
line GPR NPR Rdr*1;
line GPR GPR_b GPR_d *1;
line F_PAR F_par_b F_PAR_d * 1;
line sum_GPR sum_NPR sum_RD * 1;
run;quit;

%beer_PS(beer_PS_S,10,51,1400,200);
proc insight data=beer_PS_S;
line GPR NPR Rdr*1;
line GPR GPR_b GPR_d *1;
line F_PAR F_par_b F_PAR_d * 1;
line sum_GPR sum_NPR sum_RD * 1;run;
proc gplot data=beer_PS_S;
plot (GPR NPR Rdr)*1/overlay vref=0 legend;
plot (GPR GPR_b GPR_d) *1/overlay legend;
plot (F_PAR F_par_b F_PAR_d) * 1/overlay legend;
plot (sum_GPR sum_NPR sum_RD) * 1/overlay legend;
run;quit;

```

3 Ergebnisse *Hüfner*

3.1 Bruttphotosynthese, Nettphotosynthese und Dunkelatmung

Die von uns errechnete Bruttphotosyntheserate erreicht bei einer Blattfläche von ca $0.2m^2$ den Maximalwert von ca $0.53 \frac{\mu mol CO_2}{m^2 s}$, fällt mit zunehmender Blattfläche nicht-linear ab und wird bei einer Blattfläche von 6 bis $7 m^2$ schließlich null.

Die Veränderung des Inklinationwinkels der Sonneneinstrahlung lässt nur eine kleine Veränderung der Bruttphotosyntheserate um ca $0.1 \frac{\mu mol CO_2}{m^2 s}$ erkennen.

Eine Veränderung der direkten und diffusen PAR-Flußdichten wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist bewirkt jedoch eine deutliche Veränderung im Vergleich zu den ersten beiden Szenarien. Das Maximum der Photosyntheserate ist hier mit ca $1 \frac{\mu mol CO_2}{m^2 s}$ deutlich höher.

Die Dunkelatmung wurde in allen drei Szenarien auf $-1,6 \frac{\mu mol CO_2}{m^2 s}$ festgelegt.

Durch diese Festlegung haben die von uns veränderten Parameter keinen Einfluss auf die Dunkelatmung. Da man die Nettophotosyntheserate aus der Bruttophotosyntheserate abzüglich der Dunkelatmung berechnet verläuft die Nettophotosyntheserate wie die Bruttophotosyntheserate, nur eben um die Atmungsverluste reduziert. Der Bereich der negativen Photosyntheserate wird bei Szenario 1 (Abb.1) und Szenario 2 (Abb.2) schon bei 1.6 m^2 bzw 1.9 m^2 kumulativer Blattfläche erreicht, bei erhöhter direkter PAR-Flußdichte wie in Szenario 3 (Abb. 3) erst bei 3.4 m^2 .

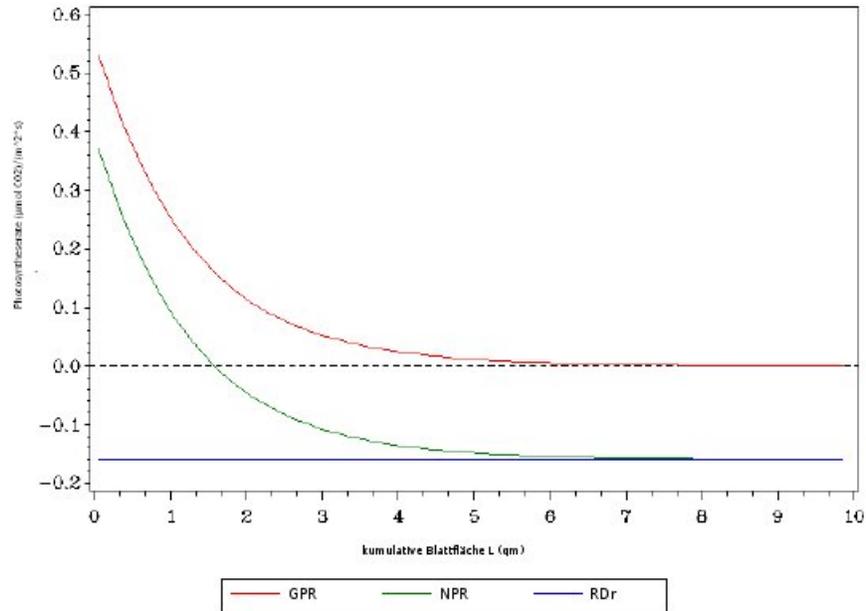


Abb.1 Bruttophotosynthese (GPR), Nettophotosynthese (NPR) und Dunkelatmung (RD) bei kumulativer Blattfläche Szenario 1

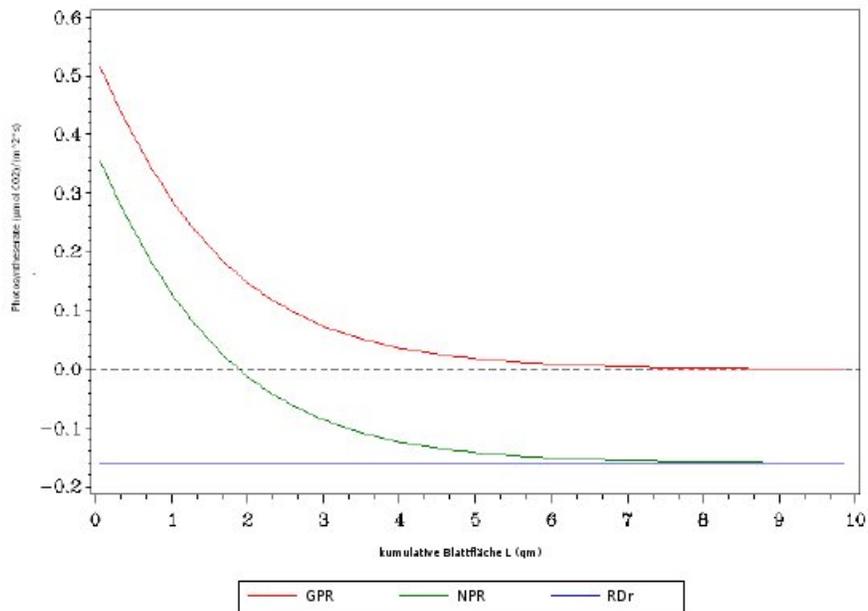


Abb.2 Bruttophotosynthese (GPR), Nettophotosynthese (NPR) und Dunkelatmung (RD) bei kumulativer Blattfläche Szenario 2

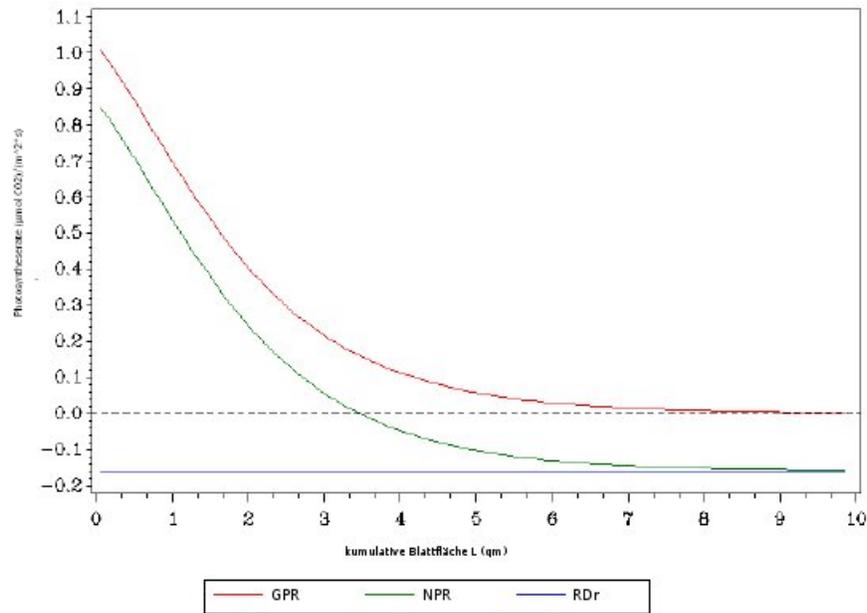


Abb.3 Bruttphotosynthese (GPR), Nettphotosynthese (NPR) und Dunkelatmung (RD) bei kumulativer Blattfläche Szenario 3



3.2 Bruttphotosynthese, Bruttphotosynthese sonnenbeschienener Blätter und Bruttphotosynthese beschatteter Blätter

In Abbildung 4 bis 6 ist wieder die Gesamtbruttphotosynthese dargestellt ergänzt um die Bruttphotosynthese für **Sonnenblätter und Schattenblätter**.

In Szenario 1 (Abbildung 1) mit einem niedrigen Inklinationwinkel der Sonneneinstrahlung von 20° erkennt man einen deutlichen Unterschied zwischen der Bruttphotosyntheserate der Sonnen- und Schattenblätter. Die Gesamtbruttphotosynthese fällt wie in Abschnitt 3.1 von einem Maximalwert bei ca. $0.53 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ exponentiell auf 0 ab, die sie bei ca. 6 m^2 kumulativer Blattfläche erreicht. Die Bruttphotosynthese der sonnenbeschienenen Blätter zeigt einen ähnlichen Verlauf, allerdings liegt ihr Maximalwert etwas niedriger bei $0.5 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ und sie fällt steiler ab, sodass bei 1.5 m^2 Blattfläche nur noch ca. $0.03 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ erreicht werden und bei 3.3 m^2 ist die Bruttphotosyntheserate hier gleich null. Im Gegensatz dazu beginnt der Verlauf der Schattenblätter niedrig bei $0.03 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ und erreicht sein Maximum, das mit $0.17 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ um ein Drittel kleiner ist als das der Sonnenblätter, erst bei einer kumulativen Blattfläche von ca. 0.85 m^2 . In diesem Szenario ist die GPR der Schattenblätter schon ab einer Blattfläche von 1.8 m^2 größer als die der Sonnenblätter und da die Sonnenblätter ab 3 m^2 Blattfläche kaum noch Photosynthese betreiben nähert sich die GPR der Schattenblätter hier Gesamtenbruttphotosyntheserate an. Ab ca. 3.3 m^2 , wenn die Sonnenblätter ihre Photosynthese einstellen ist die GPR der Schattenblätter gleich der Gesamt-GPR, da keine andere Photosynthese mehr stattfindet.

Die Verläufe der in Abbildung 5 gezeigten Bruttphotosyntheseraten des 2. Szenarios ähneln dem des 1. Szenarios. Durch die Erhöhung des Einfallswinkels der Sonne auf 51° schwächt sich jedoch der Anteil der Schattenblätter an der Bruttphotosynthese ab und die Sonnenblätter sind länger in der Lage Photosynthese zu betreiben. Die Schattenblatt-GPR erreicht hier nur einen Maximum von $0.1 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ und überschreitet die Rate der Sonnenblätter nur gering. Da die Sonnenblätter in Szenario 2 (Abb 2) etwa doppelt so lange produzieren wie im ersten Szenario sinkt gegen Ende bei sehr niedrigen Produktionsraten die GPR der Schattenblätter sogar wieder unter die der Sonnen-

blätter.

Das 3. Szenario (Abb.3) zeigt bei gleichbleibendem hohen Sonneneinfallswinkel 51° den Effekt der Erhöhung der direkten und diffusen PAR-Flußdichte auf die Bruttphotosyntheserate. Die Gesamtbruttphotosyntheserate wird durch diese Änderung verdoppelt (vgl Ausführungen 3.1), eine Verschiebung der Anteile der GPR der Schatten- und Sonnenblätter gegenüber Szenario 2 mit demselben Einfallswinkel ist jedoch kaum festzustellen.

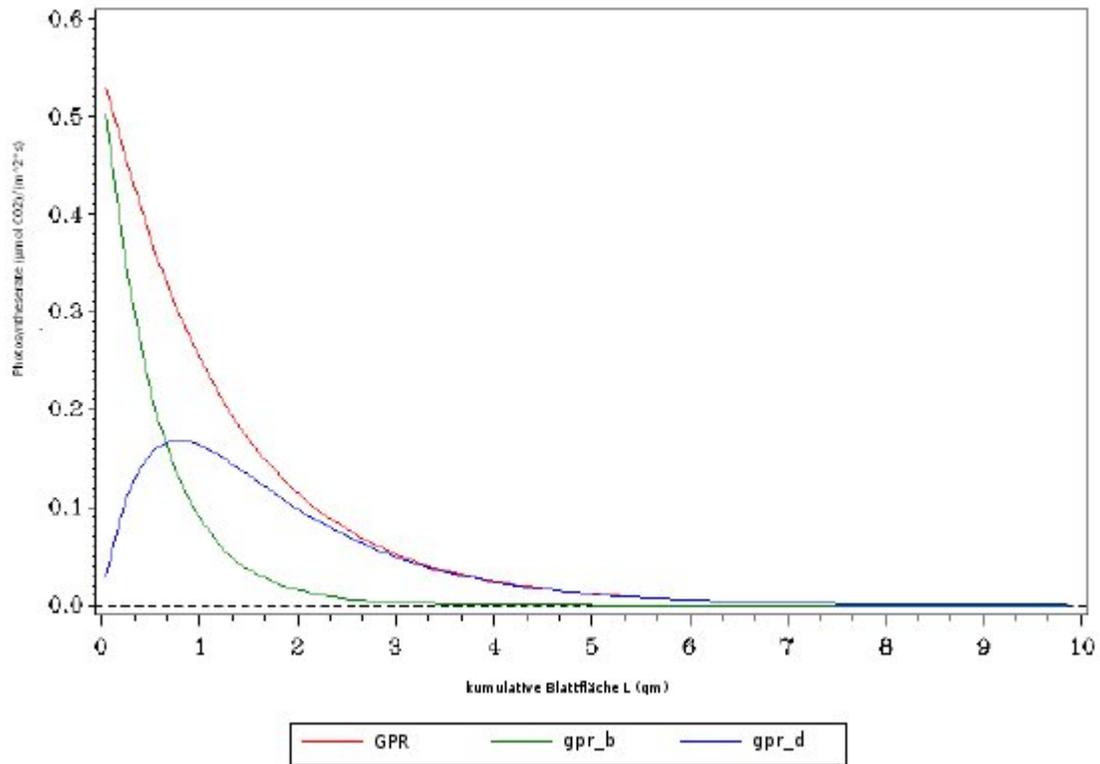


Abb. 4: Bruttphotosynthese (GPR), Bruttphotosynthese sonnenbeschienenen Blätter (gpr_b) und beschatteter Blätter (gpr_d) bei kumulativer Blattfläche Szenario 1

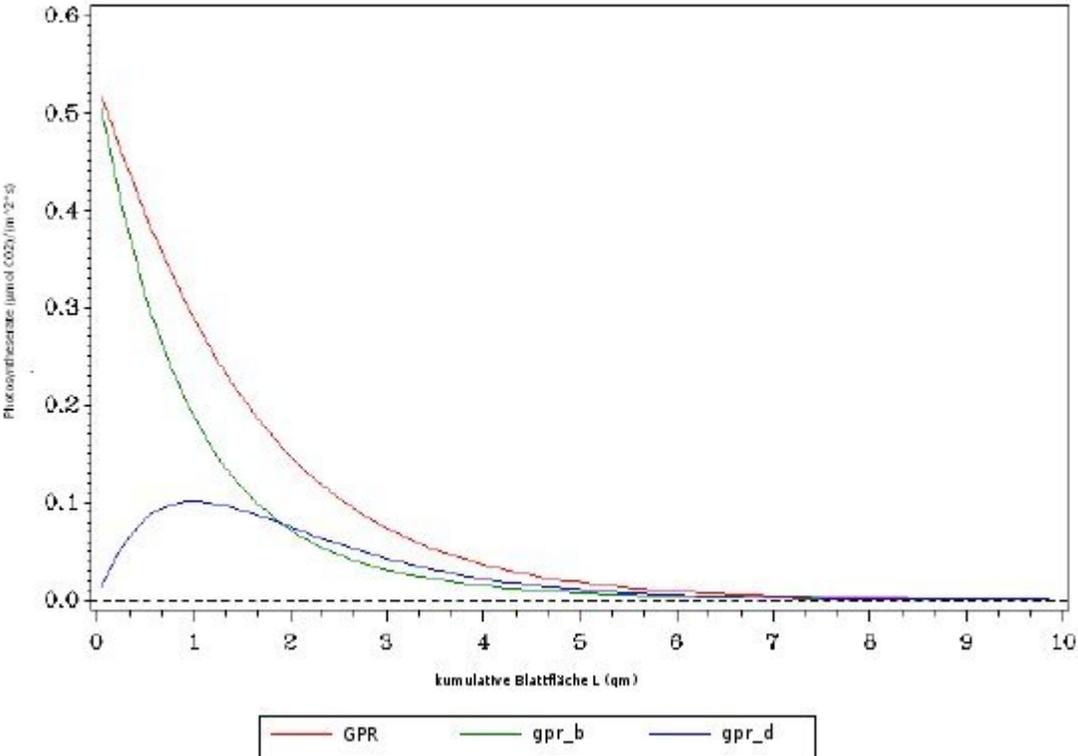


Abb. 5: Bruttphotosynthese (GPR), Bruttphotosynthese sonnenbeschienenen Blätter (gpr_b) und beschatteter Blätter (gpr_d) bei kumulativer Blattfläche Szenario 2

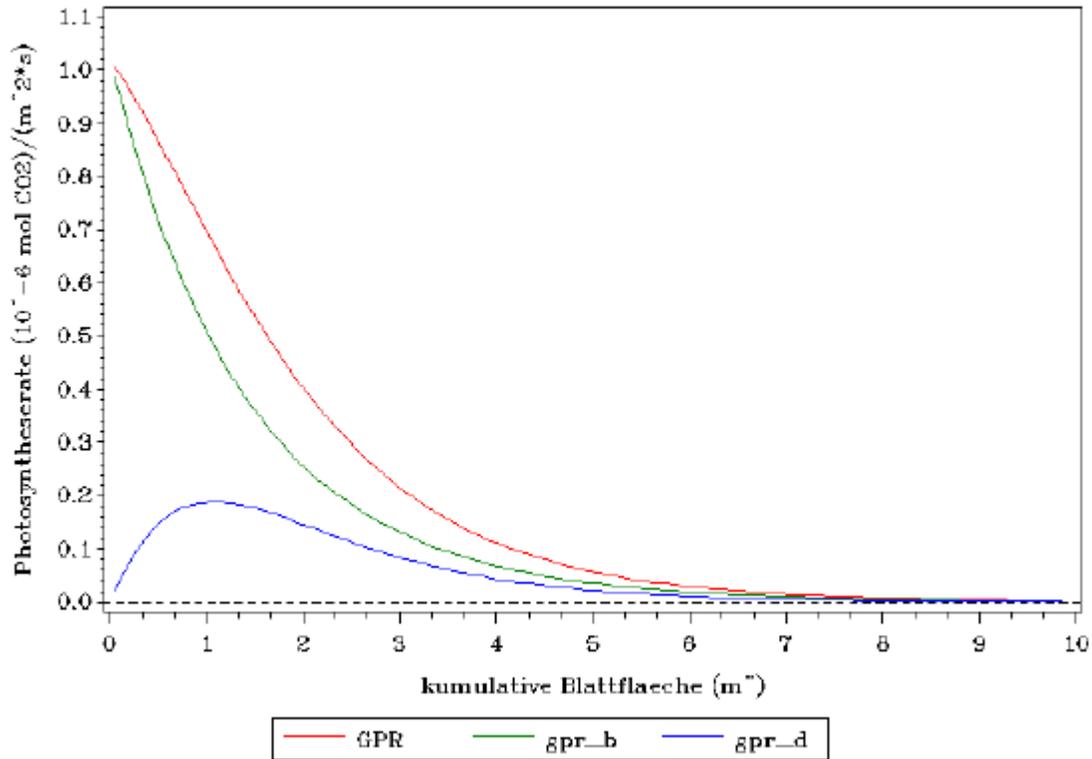


Abb. 6: Bruttphotosynthese (GPR), Bruttphotosynthese sonnenbeschienenen Blätter (gpr_b) und beschatteter Blätter (gpr_d) bei kumulativer Blattfläche Szenario 3

3.3 Photonenflussdichten

Auch die in Abbildung 7 bis 9 dargestellten Photonenflussdichten unserer 3 Szenarien fallen von einem Maximum hyperbolisch auf null ab. Zu sehen ist die gesamte Photonenflußdichte und die jeweiligen Anteile der Photonenflußdichten der direkten und diffusen Strahlung an der gesamten Photonenflußdichte.

In Szenario 1 (Abb. 1) liegt das Maximum der Photonenflußdichte bei ca $190 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, das der diffusen Strahlung bei ca $97 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ und nur wenig darunter das der direkten Strahlung bei ca $93 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$. Da bei Szenario 1 durch den geringen Einfallswinkel von 21° der Extinktionskoeffizient für die direkte Strahlung $k=0.6$ beträgt fällt die mit $k=0.75$ festgelegte Photonenflussdichte der diffusen Strahlung deutlich langsamer ab als die der direkten Strahlung. Daher kommen schon bei 3 m^2 Blattfläche kaum noch und ab 5.3 m^2 gar keine Photonen aus direkter Strahlung mehr an. Die Gesamt-Photonenflussdichte wird so schon ab ca 3 m^2 Blattfläche fast ausschließlich aus dem Photonenfluss der diffusen Strahlung gebildet bis sie bei ca 7 m^2 Blattfläche null wird.

In Szenario 2 (Abb. 8) haben die Photonenflussdichten der diffusen und direkten Strahlung wie in Szenario 1 ihre Maxima im Bereich zwischen 95 und $100 \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$. Im Gegensatz zur Abb.1 ist die Flußdichte aus direkter Strahlung durchgehend höher als die aus diffuser Strahlung. Die Anteile der beiden Flußdichten an der Gesamtflußdichte sind jedoch bis zum Nullpunkt nur wenig unterschiedlich, da hier der Exktinktionskoeffizient der direkten Strahlung mit $k=0.746$ nur wenig geringer ist als der von uns auf $k=0.75$ festgelegte Extinktionskoeffizient der diffusen Strahlung. Erhöht man die direkte und diffuse Strahlung wie in Szenario 3 (Abb. 3) geschehen, zeigt sich eine

entsprechend stärkere Photonenflußdichte dieser beiden Strahlungen.

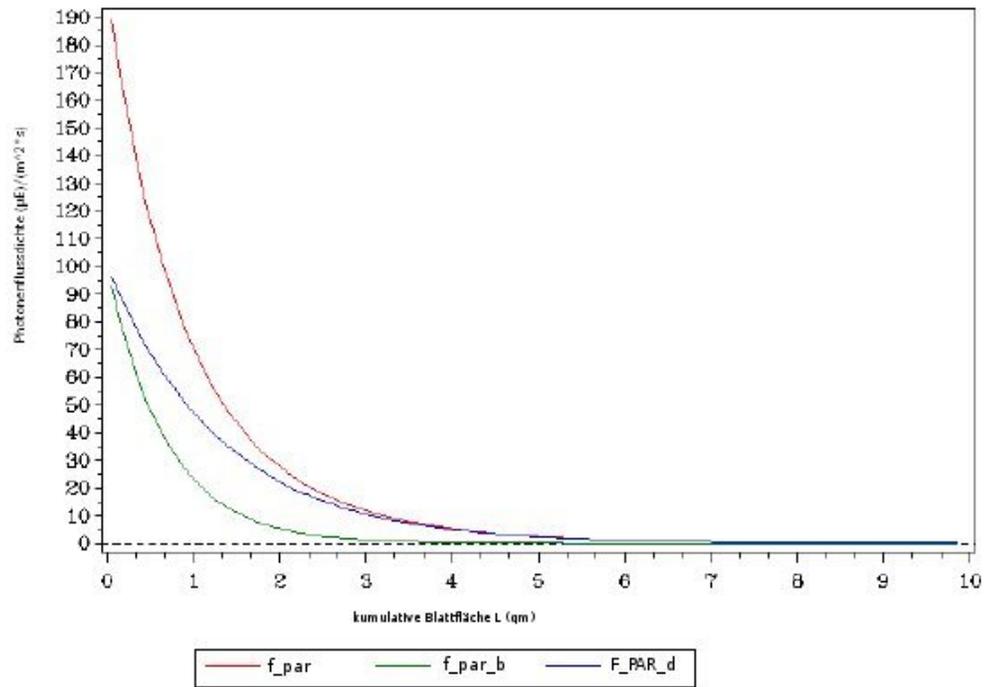


Abb. 7: Gesamte Photonenflußdichte f_{par} , Photonenflußdichte der direkten Strahlung f_{par_b} und Photonenflußdichte der diffusen Strahlung f_{par_d} bei kumulativer Blattfläche Szenario 1

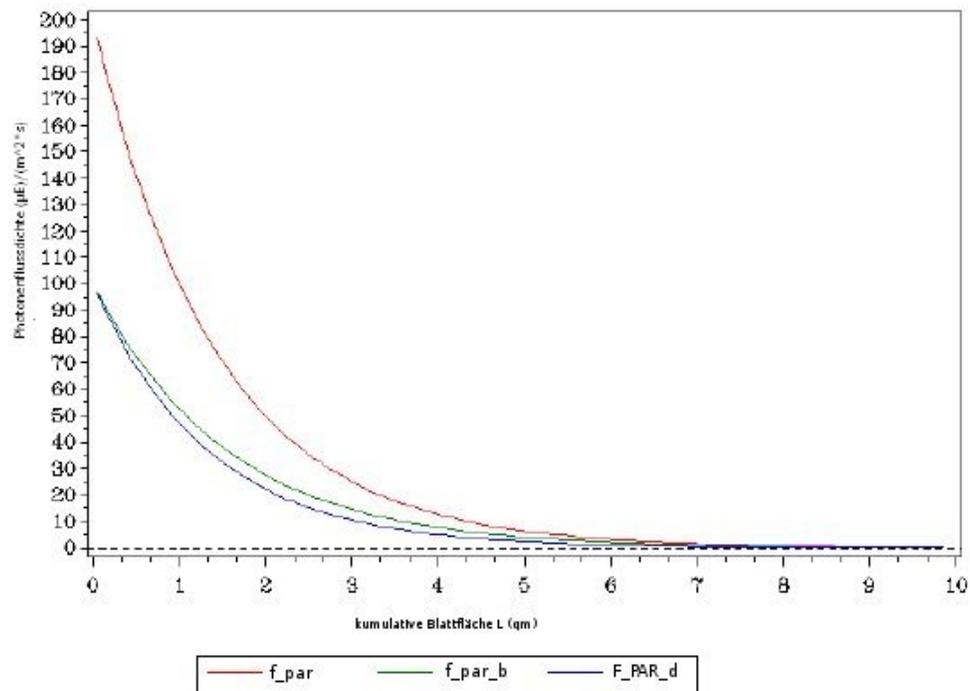


Abb. 8: Gesamte Photonenflussdichte f_{par} , Photonenflussdichte der direkten Strahlung f_{par_b} und Photonenflussdichte der diffusen Strahlung f_{par_d} bei kumulativer Blattfläche Szenario 2

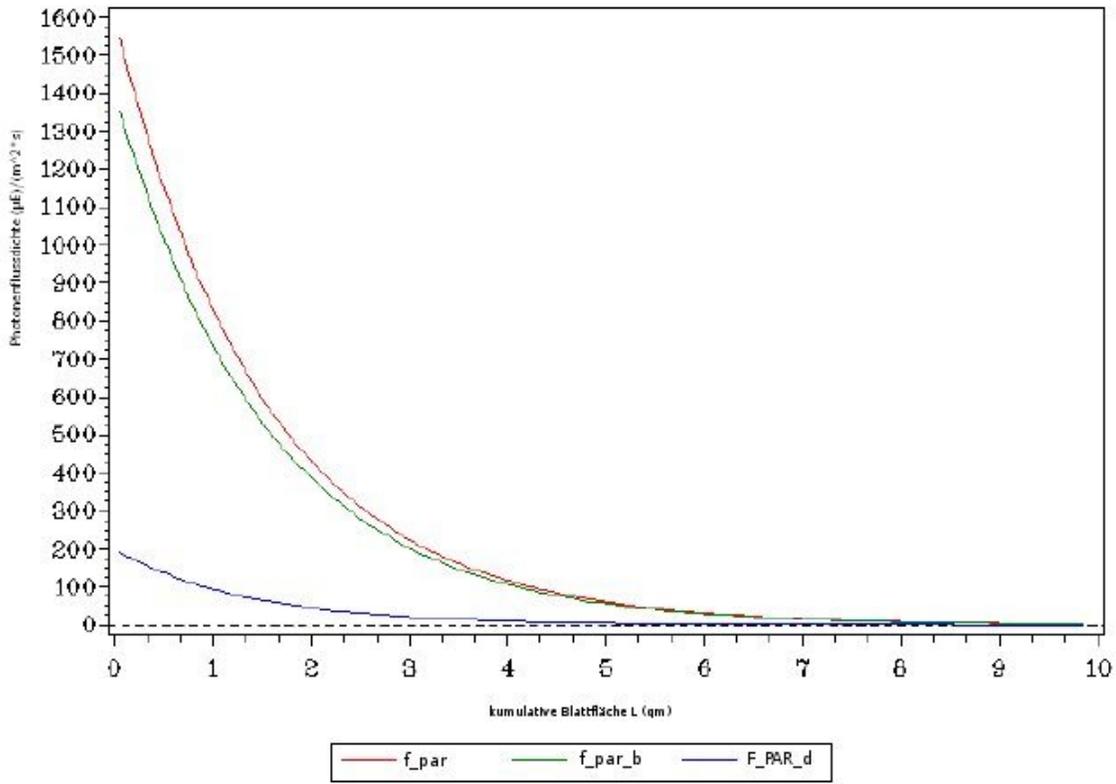


Abb. 9: Gesamte Photonenflussdichte f_{par} , Photonenflussdichte der direkten Strahlung f_{par_b} und Photonenflussdichte der diffusen Strahlung f_{par_d} bei kumulativer Blattfläche Szenario 3

3.4 Summen der Bruttphotosynthese, Nettphotosynthese und Dunkelatmung

Abbildung 10 bis 12 zeigt die Summen der Bruttphotosynthese, Nettphotosynthese und Dunkelatmung für unsere 3 Szenarien.

Bei niedrigem Sonneneinfallswinkel in Szenario 1 (Abb. 10) wird die Nettphotosyntheserate schon bei ca. 4.3 m^2 Blattfläche negativ, da die Dunkelatmung linear abfällt, während die Bruttphotosynthese nur bis 4 m^2 ansteigt und dort dann stagniert. Das Maximum der Nettphotosyntheserate liegt bei ca. 2 m^2 .

Der erhöhte Sonneneinfallswinkel in Szenario 2 (Abb. 11) wirkt sich durch eine leicht erhöhte Bruttphotosyntheserate aus. Da die Dunkelatmung nach unserem Berechnungsmodell gleich bleibt wird somit auch die Nettphotosyntheserate etwas größer und ist länger positiv.

Die stark erhöhte direkte und diffuse Einstrahlung in Szenario 3 (Abb. 3) führt zu einer stark erhöhten Bruttphotosynthese (vgl 3.1) und dadurch zu einer durchgehend positiven Nettphotosyntheserate.

Die im Makro verwendete Dunkelatmung von $R_d = 1.6 \text{ CO}_2/\text{m}^2$ gilt bei 20°C für Sonnennadeln, eine Betrachtung für Schattennadeln mit $R_d = 0.8 \text{ CO}_2/\text{m}^2$ würde jeweils eine längere positive Nettphotosyntheserate ergeben.

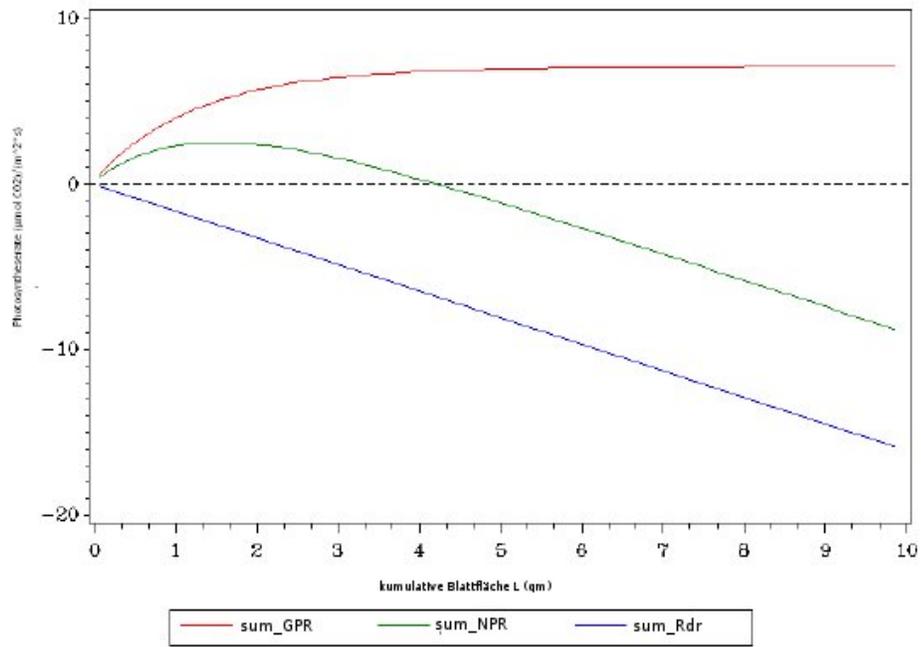


Abb. 10: Die Summen der Bruttphotosynthese sum_GPR , Nettophotosynthese sum_NPR und Dunkelatmung sum_RD bei kumulativer Blattfläche L
Szenario 1

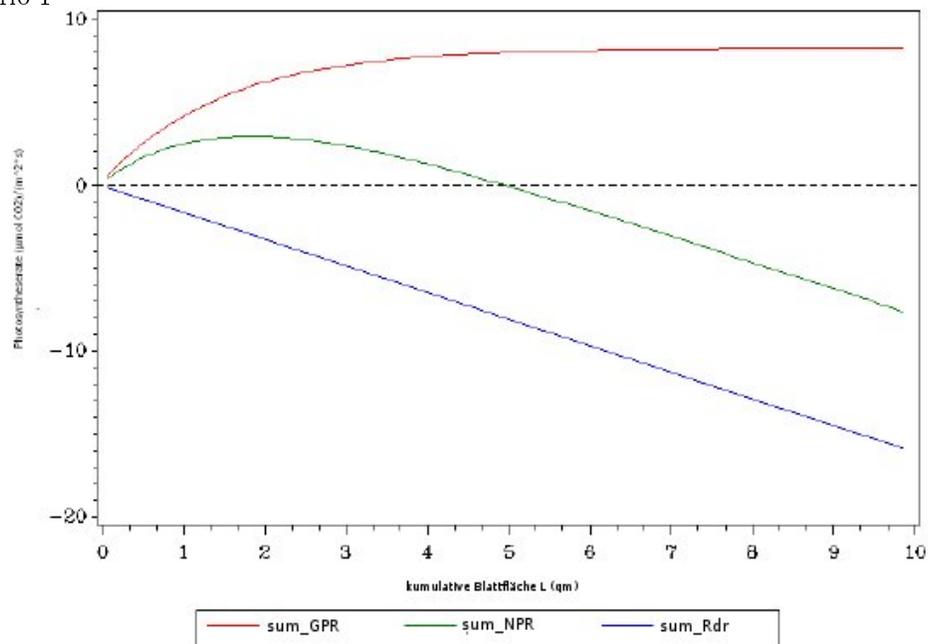


Abb. 11: Die Summen der Bruttphotosynthese sum_GPR , Nettophotosynthese sum_NPR und Dunkelatmung sum_RD bei kumulativer Blattfläche
Szenario 2

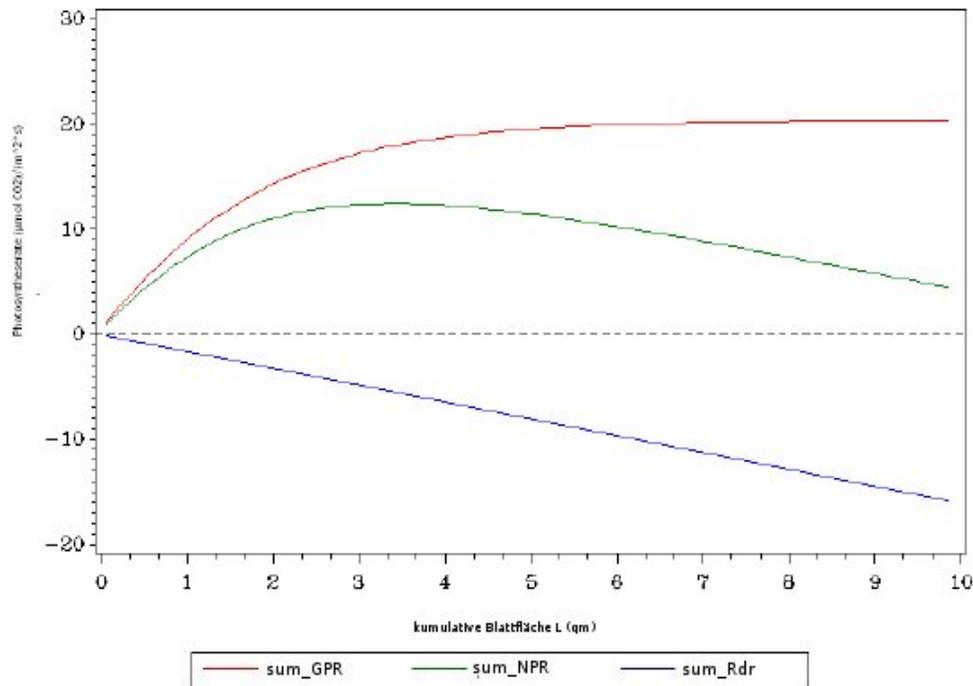


Abb. 12: Die Summen der Bruttophotosynthese sum_GPR , Nettophotosynthese sum_NPR und Dunkelatmung sum_RD bei kumulativer Blattfläche Szenario 3

4 Diskussion_{Heß}

Welche Auswirkungen hat die Schichtdicke auf die Ergebnisse der Simulation?

Durch eine Erhöhung der Schichtdicke werden weniger Schichten berechnet, so werden bei der von uns gewählten Schichtdicke von 0.1 m^2 fast 100 Schichten berechnet (Abb.1), erhöht man diesen Wert aber auf 0.5 m^2 , so werden durch die Schleife nur $1/5$ so viele Schichten berechnet und der Abbildungsbereich wird kleiner.

Da die Lichtantwortkurve hyperbolisch und nicht linear verläuft birgt die bei der Berechnung vorgenommene Mittelung außerdem ein Fehlerrisiko, das mit steigender Schichtdicke zunimmt.

Wie groß ist die relative PAR-Absorption in Abhängigkeit von LAI und Sonnenwinkel für diffuse und für direkte Strahlung?

Da die kumulative Blattfläche für größere LAI zunimmt, wird auch die Abschwächung der Strahlung größer.

Der Sonnenwinkel wirkt sich in unseren Berechnungen nur auf die direkte Strahlung aus, da für deren Berechnung der Extinktionskoeffizient verwendet wird und dieser den Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung beinhaltet. Der Extinktionskoeffizient der diffusen Strahlung wurde von uns auf $k=0.75$ festgelegt. Die Absorption der direkten Strahlung variiert dementsprechend je nach Einfallswinkel.

Ein niedriger Einfallswinkel (21°) führte zu einer schnelleren Absorption der direkten Strahlung, ein höherer Einfallswinkel von 51° lässt also mehr Strahlung nach unten gelangen.

Welche Beziehungen sehen Sie zwischen LAI und Brutto-Photosynthese (GPR)?

Eine Erhöhung des LAI führt zu mehr photosynthesefähiger Blattmasse an der Oberfläche des Bestandes und so zu einer höheren Photosyntheserate. Dieser Anstieg verläuft jedoch asymptotisch da diese Blätter darunter liegende Blätter beschatten und somit den Anstieg der Photosyntheserate abbremsen.

Welche Unterschiede bewirkt die diffuse Strahlung in der Beziehung zwischen GPR und LAI?

Die diffuse Strahlung hat je nach Einfallswinkel der Sonne und Flußdichte der ankommenden Strahlung (vgl Abschnitt 3.3) einen großen Anteil an der Anlieferung der Photonen für die Photosynthese. Eine Erhöhung des LAI durch größere Absorption führt zu einer Verringerung der diffusen Strahlung in den unteren Schichten und somit zu einem geringer werdenden Anstieg der Photosyntheserate (vgl Abschnitt 3.4).

Welche Beziehungen sehen Sie zwischen LAI und Netto-Photosynthese?

Der Verlauf der Nettophotosynthese wird in unserem Modell vom Verlauf der Bruttophotosynthese und der Dunkelatmung bestimmt. Da die Dunkelatmungsrate von der Blattfläche abhängt erhöht sie sich für größer werdende LAI. Da ein hoher LAI durch Absorption die Transmission nach unten verhindert, können so beschattete Blätter keine Photosynthese betreiben und müssen ~~stattdessen~~ respirieren und somit Energie verbrauchen. Also wird auch die Nettophotosyntheserate bei steigendem LAI nicht immer größer, sondern verläuft je nach Witterung und Sonnenstand bis zu einem Maximal- oder Minimalwert (Abb. 10 bis 12).

Welche Auswirkungen hätte eine Klumpung von Blattfläche auf die Ergebnisse der Simulationen?

Eine Klumpung würde das Ergebnis der  mulation verfälschen, da zwar an dieser Stelle eine höhere Absorption stattfinden würde, an anderer Stelle dafür aber mehr Strahlung nach unten gelangen könnte, der gesamte LAI würde aber wahrscheinlich überschätzt und die Photosyntheserate der unteren Schichten unterschätzt werden.

Was würde sich ändern, wenn die Blätter nicht schwarz wären?

Da wir die Absorptionsrate mit $\alpha = 1$ angenommen haben und dies nur bei schwarzen Blättern der Fall wäre, muss für grüne Blätter die Absorptionsrate herabgesetzt werden, dies führt zu einer Verringerung der Photosyntheserate ~~in der oberen Schicht~~.

Außerdem haben wir die Transmission und Reflexion ignoriert, grüne Blätter lassen aber Strahlung hindurch und reflektieren sie auch. Die Strahlung die so zusätzlich in die tieferen Schichten gelangt dürfte dort die Photosyntheserate erhöhen.

Fassen Sie die problematischen Vereinfachungen in dem Vorgehen zusammen.

Wie oben bereits angesprochen geht das Modell von "schwarzen Blättern" und einer homogenen Materie ohne Klumpungen aus. Beides ist aber in einem Wald so nicht gegeben.

Die Dunkelatmung wurde von uns als fester Wert festgelegt, obwohl er in Wirklichkeit auch Schwankungen unterliegt, außerdem wurde durchgehend die Atmungsrate für Sonnenblätter verwendet, da Schattenblätter eine niedrigere Atmungsrate haben wird die Dunkelatmung dadurch überschätzt.

Auch die Konkurrenz in einem Bestand findet keine Beachtung, wie auch zusätzlich für Photosynthese wichtige Größen wie z.B. Temperatur und Wasserversorgung der Bäume.

Die von uns veränderten Parameter wie Sonneneinfallswinkel, diffuse und direkte PAR-Einstrahlung sind jeweils für den gesamten Zeitraum der Simulation gleich, in der Umwelt dürfte das nur für kurze

Zeiträume zutreffen, da sich der Sonnenstand im Tagesverlauf beständig ändert und auch die Bewölkung meist nicht lange dieselbe bleibt.

5 **Schlußfolgerungen***Hüfner*

Trotz aller Vereinfachungen liefert uns das Modell doch brauchbare Ergebnisse und das mit relativ wenig Aufwand. Ziemlich praktisch.

