

RESEARCH NOTE

DACHRad – Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung in Deutschland, Österreich und der Schweiz

HAGEN S. FISCHER¹ & HANS GILGEN²

¹Institut für angewandte ökologische Studien (ifanos), Hessestraße 4, D-90443 Nürnberg, Deutschland; ²Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, Winterthurer Straße 190, CH-8057 Zürich, Schweiz; H.Fischer@ifanos.de

Summary

1 Direct solar radiation is a driving force for many ecological processes. Depending on their geographic and topographic position, sites receive different amounts of direct radiation per unit of area and time; this affects the temperature and soil moisture and thus, biological and chemical properties of soils. The measurement of total direct radiation over ecologically relevant periods of time (e.g. one year) requires expensive equipment for data logging. This makes it generally impossible to carry out such measurements for a large number of sites.

2 A method to compute direct solar radiation based on geographic, topographic and climatological information is presented in this paper. The regional conditions in Germany, Austria and Switzerland are taken into account through a set of parameters that were determined from available field data.

3 Examples of the spatial variability of direct radiation are given and it is shown that this is associated with major differences in the species composition of the vegetation. The precision of the method and its practicability in ecological studies are discussed.

Keywords: direct solar radiation, local climate, redundancy analysis, simulation

Bulletin of the Geobotanical Institute ETH (2002), **68**, 83–94

Einleitung

Die auf die Erde eintreffende Sonneneinstrahlung ist die Energiequelle aller biologischen Vorgänge auf unserem Planeten. Dies gilt insbesondere für die kurzwellige Sonneneinstrahlung, welche Grundlage der Photosynthese, d.h. der Primärproduktion ist. Die räumliche und zeitliche Verteilung der Sonneneinstrahlung beeinflusst auch maßgeblich den Wärme- und Wasserhaushalt der Öko-

systeme und steuert die Aktivität von Pflanzen und Tieren.

Die kurzwellige Sonneneinstrahlung wird in direkte und diffuse Strahlung unterteilt. Die direkte Sonneneinstrahlung ist räumlich gerichtet. Dadurch sind die jährlichen Einstrahlungssummen großräumig (je nach Breitengrad) und kleinräumig (auf unterschiedlich exponierten Flächen) sehr verschieden.

Dies verursacht Unterschiede im Wärmehaushalt der Standorts. Da die Einstrahlung zudem die Verdunstung beeinflusst, wirken sich Unterschiede in der direkten Sonneneinstrahlung auch stark auf den Wasserhaushalt aus. Die diffuse Sonneneinstrahlung beinhaltet die Sonnenstrahlen, die auf ihrem Weg durch die Atmosphäre an irgendwelchen Teilchen abgelenkt wurden. Sie kommt aus den verschiedenen Teilen des Himmels wesentlich gleichmäßiger auf die Erde als die direkte Strahlung. Messungen über die räumliche und zeitliche Variabilität der diffusen Strahlung liegen noch nicht in genügendem Umfang vor, um diese genau beurteilen und allenfalls modellieren zu können.

Weil Standortsunterschiede im Wärme- und Wasserhaushalt im wesentlichen durch die gerichtete direkte Sonneneinstrahlung bestimmt werden, wurde diese immer wieder erfolgreich eingesetzt, um Vegetationsmuster oder Ökosystemeigenschaften zu verstehen bzw. zu modellieren. Zum Beispiel benutzte Fischer (1990, 1994) neben anderen Standortfaktoren die direkte Sonneneinstrahlung zur Simulation der Verteilung von Pflanzengesellschaften in der Landschaft. Mit einem ähnlichen Simulationsmodell ermittelten bzw. verifizierten Tich (1999) und Lindacher (1996) Verbreitungsmuster der potentiellen natürlichen Vegetation. Schaab & Lenz (1998) und Schaab (2000) benutzten die simulierte direkte Sonneneinstrahlung zur Beschreibung des Bestandesklimas eines Steineichen-Pinien-Bestand in Italien. Michler & Arnold (1996) benutzen die simulierte direkte Sonneneinstrahlung neben anderen Standortfaktoren zu Erklärung der Variabilität von sekundären Pflanzeninhaltsstoffen in Arzneipflanzen.

Die genannten Arbeiten verwendeten nicht gemessene, sondern simulierte Werte der direkten Sonneneinstrahlung. Der Grund

hierfür ist, dass jede Messung nur die momentan eintreffende Strahlung erfasst. Für den Wärme- und Wasserhaushalt von Standorten ist aber die jährliche Einstrahlungssumme maßgeblich. Diese kann nur sehr bedingt aufgrund von einzelnen Messungen zwischen Standorten verglichen werden, weil der Tages- und Jahresgang der Einstrahlung vom Relief und von den Witterungsbedingungen abhängt. Eine genaue Messung der jährlichen Einstrahlungssumme bedingt also die kontinuierliche Erfassung der Strahlungssintensität im Jahresverlauf, d.h. den Einsatz teurer Messgeräte, der nur an einzelnen Standorten möglich ist. Für den Vergleich vieler Standorte, z.B. im Rahmen von vegetationskundlichen Untersuchungen, kann die jährliche Einstrahlungssumme aus diesen Gründen nicht direkt gemessen werden.

Die traditionelle Lösung besteht in vegetationskundlichen Untersuchungen darin, Standortfaktoren wie die Höhe über dem Meer, Exposition und Hangneigung zu erheben. Die Höhe über dem Meer kann als Indikator für Temperatur und Niederschlag auch in numerischen Analysen problemlos verwendet werden. Hingegen bereiten Exposition und Neigung einige Schwierigkeiten. Die Hangneigung beeinflusst nicht nur den oberflächlichen Niederschlagsabfluss und das Schneegleiten, sondern auch das Kleinklima. Letzteres hängt aber auch von der Exposition ab. Nur eine gemeinsame Interpretation von Exposition und Neigung erlaubt eine Einschätzung der durch die Sonneneinstrahlung bestimmten Komponenten der lokalklimatischen Verhältnisse. Diese Einschätzung ist letztlich qualitativ, da keine linearen Zusammenhänge zwischen den genannten Standortfaktoren und Temperatur, Evaporation oder Niederschlag bestehen.

Die Alternative besteht darin, die jährliche Einstrahlungssumme aufgrund von Informa-

tion über die geographische Lage, Höhe über dem Meer, Exposition und Neigung unter Berücksichtigung der lokalen Wetterbedingungen zu berechnen. Derartige Verfahren wurden bereits von Garnier & Ohmura (1968), Funk (1983), Kunz (1983) und anderen entwickelt. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein neues Verfahren, das Simulationsmodell DACHRad, welches mit Hilfe einer Kalibration aufgrund von empirischen Messwerten spezifisch an die Witterungsbedingungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz angepasst wurde. Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Methode beschrieben. Im zweiten Teil wird gezeigt, wie die Ergebnisse solcher Berechnung in vegetationskundlichen Untersuchungen eingehen können. Schließlich werden das hier vorgestellte und die bestehenden Verfahren im Hinblick auf ihre Genauigkeit und die Praktikabilität ihrer Anwendung in der Vegetationskunde verglichen.

Methoden

POSITION DER SONNE

Die Intensität der direkten Sonneneinstrahlung kann bestimmt werden, wenn die Position der Sonne zu jedem Zeitpunkt am Tag und an jedem Tag im Jahr bekannt ist. Um die Position der Sonne zu beschreiben sind zwei Kugelkoordinatensysteme gebräuchlich, das Horizontsystem und das Äquatorsystem.

Im *Äquatorsystem* wird die Position der Sonne mit den Kugelkoordinaten Deklination δ und Stundenwinkel η beschrieben. Die Deklination ist der Winkel zwischen dem Äquator und der Position der Sonne. Der Winkel zwischen dem Südmeridian und dem Sternmeridian ist der Stundenwinkel η . Die Deklination ist eine Funktion des Tages im Jahr, hängt aber kaum von der Tageszeit ab. Der Stundenwinkel dagegen ist eine Funktion der wahren Sonnenzeit; um 12.00 Uhr beträgt

er 0° . Eine Näherungsformel zur Berechnung der Deklination d wurde von Palmage (1976, zit. Funk 1985) entwickelt (Formal 1 im Anhang). Der Jahresgang der Deklination ist in Fig. 1a dargestellt.

Im *Horizontsystem* wird die Position der Sonne in Bezug auf den astronomischen Horizont des Beobachters mit den Kugelkoordinaten Azimut und Zenitwinkel θ beschrieben. Das Azimut ist der Winkel der Sonnenposition am Horizont. Um 0.00 Uhr (wahrer Sonnenzeit) ist das Azimut 0. Der Zenitwinkel ist der Winkel zwischen dem Himmelspunkt über dem Beobachter (Zenit) und der Sonnenposition. Wegen der Schiefe der Erdachse gegenüber der Erdbahn und weil die Erde sich dreht, ändern sich im Laufe eines Tages das Azimut und der Zenitwinkel (zur Berechnung siehe Formel 2 im Anhang).

TAGESZEIT

Um die Position der Sonne zu berechnen muss die Tageszeit bekannt sein. Die Zeit kann auf verschiedene Weise definiert werden: wahre Ortszeit, mittlere Ortszeit und Zonenzeit. Die wahre Ortszeit (WOZ) ist der Stundenwinkel der Sonne, d.h. die Zeit, die eine Sonnenuhr anzeigt. Aufgrund der Exzentrizität der Erdbahn und der Schiefe der Ekliptik (Neigung der Erdachse gegen die Erdbahn) verläuft die wahre Ortszeit nicht gleichmäßig. Die mittlere Ortszeit (MOZ) dagegen beruht auf einer angenommenen idealen, gleichförmigen Bahn der Erde und hängt nur vom Längengrad ab. Die Zonenzeit schließlich ist die innerhalb jeder Zeitzone geltende Uhrzeit. Die in Mitteleuropa geltende mitteleuropäische Zonenzeit (MEZ) entspricht der mittleren Ortszeit des Meridians 15° östlicher Länge. Die MEZ weicht an manchen Orten um mehr als 1.5 Stunden von der mittleren Ortszeit ab.

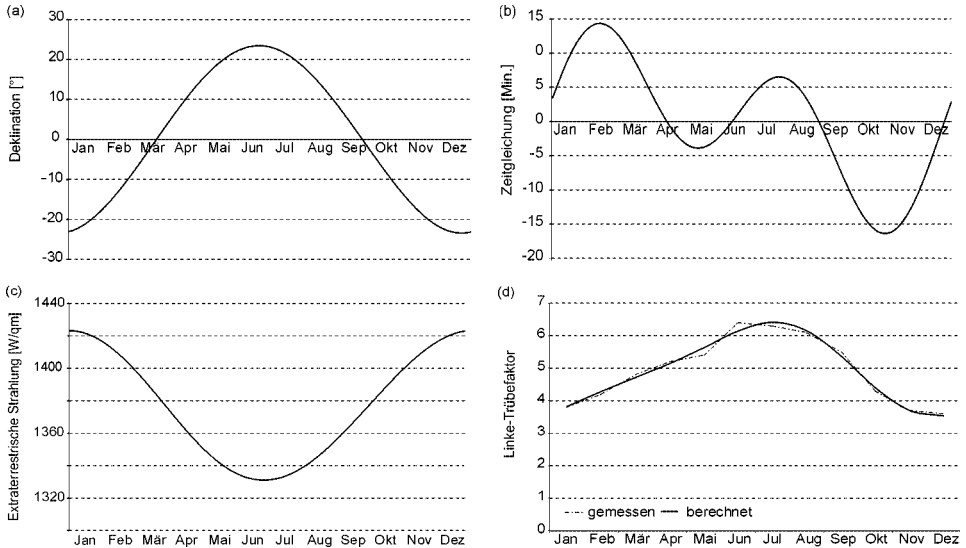


Fig. 1. Jahresgeang (a) der Deklination (Winkel zwischen Äquator und Position der Sonne), (b) der Zeitgleichung (Differenz zwischen mittlerer und wahrer Ortszeit), (c) der extraterrestrischen Strahlung und (d) des Linke-Trübefaktors (Abschwächung der Strahlung beim Durchdringen der Atmosphäre; durch Kasten et al. (1984) angegebene Messwerte sowie mit einer Fourier-Transformation berechnete Werte. Die Berechnung der dargestellten Variablen wird im Text bzw. Anhang erläutert.

Für die Berechnung der Sonnenposition muss die wahre Ortszeit herangezogen werden. Die Differenz zwischen der mittleren und der wahren Ortszeit wird durch die Zeitgleichung ZGL(d) beschrieben. Die ZGL ist eine Funktion des Tages im Jahr (d) mit vier Extremwerten (Fig. 1b). Die wahre Ortszeit ist somit (nach Palmage 1976, zit. in Funk 1985):

$$WOZ = MOZ - ZGL(d)$$

Die Zeitgleichung ZGL(d) wird dabei nach Formel (3) im Anhang berechnet. Die mittlere Ortszeit (MOZ) wird aus der Zonenzeit nach Formel (4) im Anhang berechnet.

EXTRATERRESTRISCHE INTENSITÄT DER SONNENEINSTRALUNG

Die Intensität der direkten Sonneneinstrahlung ist abhängig von der außerhalb der

Atmosphäre ankommenden Strahlungsintensität und der Abschwächung der Strahlung beim Durchdringen der Atmosphäre. Die extraterrestrische Intensität der Sonneneinstrahlung variiert im Laufe des Jahres (Fig. 1c; Berechnung gemäß Formel 5 im Anhang).

ABSCHWÄCHUNG DER STRAHLUNGSINTENSITÄT DURCH DIE ATMOSPHERE

Die Abschwächung der Strahlung beim Durchdringen der Atmosphäre hängt von der effektiven Atmosphärendicke ab. Das ist der Weg den die Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre zurücklegen. Da die effektive Atmosphärendicke morgens und abends größer ist als mittags, sind zu diesen Zeiten die auf der Erdoberfläche ankommenden Strahlungsintensitäten geringer. Dieser Effekt wird weiter überlagert von einem Tages- und

Tab. 1. Koeffizienten der Regressionsgleichung ($k_0 + \sum k_i x_i$) zur Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung aufgrund der Meereshöhe (z), dem Stundenwinkel der Sonne (η) und dem Deklinationswinkel der Sonne (δ). Die Koeffizienten k_i für jede der Kombinationen von unabhängigen Variablen (x_i) wurden mittels einer multiplen polynomialen Regression aufgrund der Messungen von Müller (1984) in den Schweizer Alpen bestimmt; unterschiedliche Koeffizienten ergaben sich für die erste und zweite Hälfte des Jahres.

i	x_i	Koeffizienten k_i	
		1. Jan.–21. Juni	22. Juni–31. Dez.
0	-	-10831.36295	-11526.51552
1	z	0.04131	0.04298
2	$\log_e(z)$	157.21824	139.83135
3	η^2	1.60067	1.72365
4	$\cos(\eta)$	10717.99492	11495.59927
5	$\delta \cdot \cos(\eta)$	120.17583	121.23979
6	$z \cdot \cos(\eta)$	-0.04741	-0.04143
7	δ	-120.12943	-122.77428
8	$\delta^2 \cdot \log_e(z)$	-0.01245105	-0.00544809
9	$\delta^2 \cdot \eta^2$	-0.00006351	-0.00007296
10	$\delta \cdot \eta^2$	0.01864848	0.01882712
11	$\delta^3 \cdot \log_e(z)$	0.00036539	0.00083023
12	η^4	-0.00004702	-0.00004965

Jahresgang der Transmissionseigenschaften der Atmosphäre, die u.a. vom Gehalt an Aerosolen, Wasserdampf und Ozon in der Atmosphäre abhängig sind. Um den Tages- und Jahresgang der auf eine Fläche senkrecht zur Strahlungsrichtung einfallenden direkten Sonneneinstrahlung bei wolkenlosem Himmel zu modellieren, sind verschiedene Ansätze möglich. Das hier vorgestellte Modell DACHRad kombiniert zwei statistische Modelle, die jeweils auf Daten von Messreihen aus unterschiedlichen Gebieten Mitteleuropas beruhen.

Als Grundlage für das erste Teilmodell dienten Messungen von Müller (1984) in den Schweizer Alpen auf Höhen zwischen 1500 m und 4000 m. Mit Hilfe einer multiplen polynomialen Regression wurde eine Formel entwickelt, mittels derer die mittlere Direktstrahlungsintensität für jeden Zeitpunkt an jedem Ort berechnet werden kann. Die Aus-

wahl der Kombinationen von unabhängigen Variablen (x_i) erfolgte dabei nach fachwissenschaftlichen und statistischen Kriterien.

$$R_0(z, \eta, \delta) = k_0 + \sum_{i=1}^{12} k_i x_i$$

R_0 Direkte Sonneneinstrahlung auf die zum Strahlengang normale Ebene bei klarem, wolkenlosem Himmel [Wm^{-2}]

z Höhe über dem Meere [m]

η Stundenwinkel der Sonne [$^\circ$] = $15^\circ/\text{h}$ (WOZ–12 h)

δ Deklinationswinkel der Sonne [$^\circ$]

k_p, x_i Regressionsgleichung; siehe Tab. 1

WOZ Wahre Ortszeit (siehe oben)

Das zweite Teilmodell beruht auf den Untersuchungen von Kasten *et al.* (1984). Diese Autoren beschrieben die Extinktion der

direkten Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit vom Sonnenstand mit Hilfe des Linke-Trübefaktors T_L :

$$T_L = (0.9 + 9.4 \cdot \sin \gamma) \cdot \ln (I_0/R_0);$$

woraus folgt: $R_0 = I_0 \cdot e^{\frac{-T_L}{0.9+9.4 \times \sin \gamma}}$

- R_0 Direkte Sonneneinstrahlung auf die zum Strahlengang normale Ebene [W m⁻²]
- I_0 Extraterrestrische Strahlung
- γ Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont
- T_L Linke-Trübefaktor

Der Linke-Trübefaktor T_L variiert im Laufe des Jahres. Kasten *et al.* (1984) gaben aufgrund von Messungen in Deutschland Monatsmittelwerte an. Mit einer Fourier-Transformation wurden diese Werte für unser Modell als Funktion des Tages im Jahr interpoliert (Formel 6 im Anhang). Der Jahresgang des Linke-Trübefaktors ist in Fig. 1d dargestellt. Die Abweichungen zwischen den von Kasten *et al.* (1984) tabellierten und den mit Formel (6) berechneten Werten des Linke-Trübefaktors sind gering.

Der Ansatz von Kasten *et al.* (1984) beruht vor allem auf Messungen in tieferen Lagen. Ob der Linke-Trübefaktor auch für höhere Lagen gilt, ist fraglich, denn theoretisch wäre zu erwarten, dass die Strahlungsintensität höhenabhängig ist. Eine solche Höhenabhängigkeit ist zwar in den Daten bei Kasten *et al.* (1984) für Deutschland statistisch nicht nachweisbar, doch könnte dies auf das relativ dünne Strahlungsmessnetz für direkte Sonneneinstrahlung und den klimatologisch betrachtet kurzen Messzeitraum zurückzuführen sein. Die meisten Zeitreihen waren erst 5 Jahre lang, wodurch das Wetter der jeweiligen Jahre die großräumigen Effekte stark überlagert.

Das Kombinationsmodell DACHRad berücksichtigt eine mögliche Höhenabhängigkeit der Strahlungsintensität, indem es die direkte Sonneneinstrahlung mit einem kombinierten Verfahren berechnet. Für Höhen über 1500 m wird die Intensität der Sonneneinstrahlung auf der Basis der polynomialen Regression und Tab. 1 berechnet. Für das Flachland (bis zu 500 m) wird mit dem Linke-Trübefaktor nach Kasten *et al.* (1984) gerechnet. Dazwischen werden die Werte der beiden Verfahren linear interpoliert.

EINFLUSS DER BEWÖLKUNG

Neben den Transmissionseigenschaften der Atmosphäre bei klarem Himmel beeinflusst auch die Bewölkung die Intensität der direkten Sonneneinstrahlung. Um dies zu berücksichtigen, muss der mittlere Tagesgang der relativen Sonnenscheindauer in Abhängigkeit von der Jahreszeit bekannt sein. Bei der Integration der Sonneneinstrahlung wird jeder Strahlungswert mit der relativen Sonnenscheindauer der jeweiligen Stunde des betreffenden Tages multipliziert und so die Bewölkung in der Berechnung mit einbezogen. Die Daten über die relative Sonnenscheindauer können u.a. aus der Datenbank der Schweizer Meteorologischen Anstalt (SMA) oder des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen werden.

EINFLUSS DES RELIEFS

Die anhand der obenstehenden Formeln berechnete Strahlungsintensität gilt für eine Fläche, auf welche die Sonnenstrahlen senkrecht auftreffen. Für eine beliebig geneigte Fläche muss diese Strahlungsintensität noch mit dem Kosinus des Winkel α zwischen der Strahlungsrichtung der Sonne und dem Vektor, der auf der Fläche senkrecht steht (Normalenvektor), gewichtet werden. Dies

ergibt die effektiv auf eine bestimmte Fläche einstrahlende Energie.

Neben der Exposition und Neigung einer Fläche beeinflusst auch die Horizontüberhöhung durch Berge, nahegelegene Wald-ränder oder Gebäude den Strahlungsgenuss einer Fläche. Zur Untersuchung von einzelnen Flächen können die Exposition, die Neigung und die Horizontüberhöhung im Gelände mit einem Kompass und einem Taschenklinometer gemessen werden. Zur Anwendung auf größere Untersuchungsgebiete können die Daten auch aus einem digitalen Geländemodell abgeleitet werden (Gilgen *et al.* 1988).

Für die effektiv auf eine Fläche mit gegebener Hangneigung und Horizontüberhöhung einfallende direkte Sonneneinstrahlung R_{eff} ergibt sich somit:

$$R_{eff}(t,z) = R_0(t,z) \cdot P_{rad}(t) \cdot \cos \alpha$$

R_{eff}	Effektive direkte Sonneneinstrahlung [W m ⁻²] auf eine Fläche in Meereshöhe z zum Zeitpunkt t
R_0	Direkte Sonneneinstrahlung auf die zum Strahlengang normale Ebene
$P_{rad}(t)$	Relative Sonnenscheindauer zum Zeitpunkt t
t	Zeitpunkt, d.h. Tageszeit und Tag im Jahr
α	Winkel zwischen Einstrahlungsrichtung der Sonne und dem Normalenvektor der Fläche

STRAHLUNGSSUMMEN UND DEREN RÄUMLICHE VERTEILUNG

Zur Berechnung von Strahlungssummen über einen beliebigen Zeitraum (Tag, Monat, Vegetationsperiode u.a.) wird im DACHRad-Modell der Lauf der Sonne in 20-Minuten-Intervallen berechnet und für jeden Zeitpunkt überprüft, ob die Sonne über dem

Horizont steht. Wenn die Sonne über dem Horizont steht, werden die Intensitäten der direkten Sonneneinstrahlungen numerisch integriert.

Diese Berechnung kann in einem Raster für jeden Punkt eines Untersuchungsgebiets durchgeführt werden. Mit Hilfe eines geographischen Informationssystems können dann auch Karten der direkten Sonneneinstrahlung erstellt und mit Karten anderer Standortfaktoren in Beziehung gesetzt werden (z.B. Fischer 1994). Fig. 2 zeigt als Beispiel die räumliche Verteilung der direkten Sonneneinstrahlung in der Umgebung von Davos in den Monaten Juni und Dezember.

Anwendungsbeispiel

Die mit DACHRad berechnete direkte Sonneneinstrahlung kann als quantitative Variable in die Auswertung von vegetationskundlichen Erhebungen eingehen. Als Beispiel dienen Vegetationsaufnahmen, die der erste Autor im Rahmen eines Gutachtens zuhanden des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz durchgeführt hat. Der Datensatz enthält 26 Aufnahmen von Mittelgebirgswiesen und Wiesenbrachen aus dem Landkreis Wunsiedel (Oberfranken). Die Deckungswerte der Arten wurde nach der in Fischer (1999) beschriebenen Methode quantitativ exakt erfasst. Zur Charakterisierung des Standorts wurden die Höhe über dem Meer, die Exposition, die Hangneigung sowie die Horizontüberhöhung in 8 Himmelsrichtungen erhoben. Diese Daten wurden zur Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung mit Hilfe von DACHRad verwendet. Aus einer Bodenprobe wurden der pH(CaCl₂) sowie die Hauptnährelemente Kalium und Phosphat bestimmt.

Die 26 Aufnahmeflächen lagen zwischen 500 und 640 m ü. M. Ihre Exposition war vor

Tab. 2. Mittlere Meereshöhe, Exposition, Hangneigung und mittlere tägliche Strahlungssumme im Mai (direkte Sonneneinstrahlung) der Standorte von 26 Mittelgebirgswiesen in Oberfranken (D). Angegeben sind die Mittelwerte \pm Standardabweichungen der drei Vegetationstypen (pflanzensoziologische Verbände). Die Exposition wurde als Winkel zur Südrichtung ausgedrückt (0° = Süd, 180° = Nord). Die Strahlungssumme wurde mit DACHRad berechnet.

	Höhe (m ü. M.)	Exposition ($^\circ$ zu Süd)	Neigung (%)	Strahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
<i>Nardion</i>	546 \pm 32	128 \pm 46	11.5 \pm 14.5	35.1 \pm 2.8
<i>Calthion</i>	558 \pm 52	158 \pm 42	3.4 \pm 4.9	31.3 \pm 4.8
<i>Polygono-Trisetion</i>	505 \pm 12	116 \pm 41	6.5 \pm 3.9	36.4 \pm 1.3

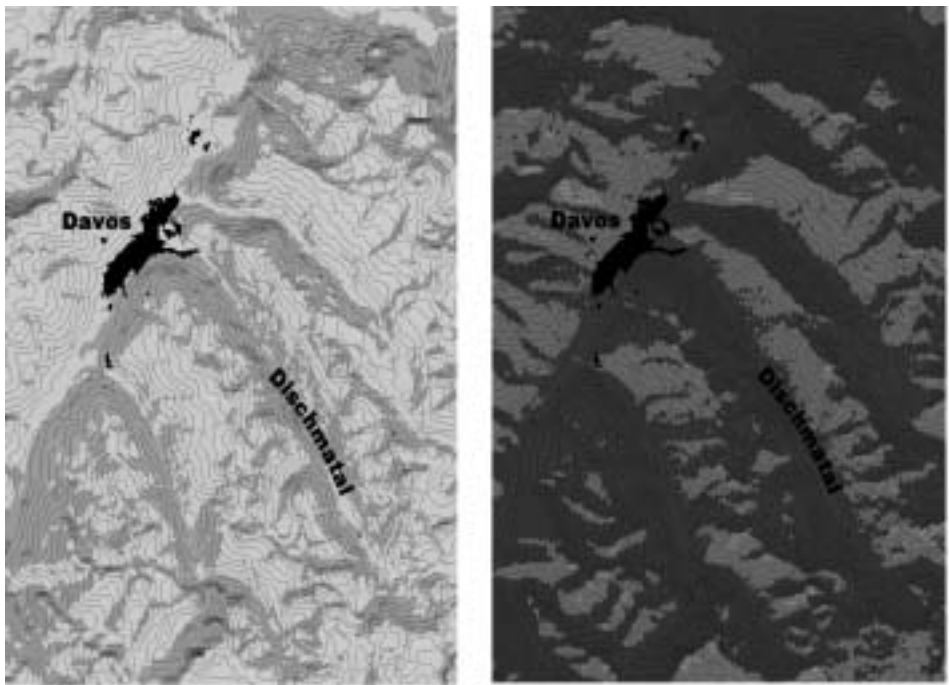


Fig. 2. Räumliche Verteilung der direkten Sonneneinstrahlung in der Umgebung von Davos in den Monaten Juni und Dezember, berechnet mit dem Programm DACHRad aufgrund von Daten der Schweizer Meteorologischen Anstalt (SMA) und eines digitalen Geländemodells. Je heller die Färbung, desto grösser die monatliche Strahlungssumme. Deutlich wird der Einfluss der Exposition auf die direkte Sonneneinstrahlung.

allem Nord bis West, und die Hangneigung reichte von 0° bis 35° . Die berechnete mittlere tägliche Sonneneinstrahlung im Mai betrug zwischen 21.2 und $39.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Die Vegetation der 26 Aufnahmeflächen konnte grob in

drei Typen eingeteilt werden: Borstgrasrasen (*Nardetalia*), Dotterblumenwiesen (*Calthion*) und Goldhaferwiesen (*Polygono-Trisetion*). Tab. 2 enthält die mittleren Standortbedingungen der drei Gruppen von Vegetations-

aufnahmen. Diese unterschieden sich vor allem in der Neigung und der Sonneneinstrahlung.

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Vegetation und Standort erfolgte mit einer Redundanzanalyse (RDA) mit dem Programm CANOCO (ter Braak, 1988, 1990). Diese ergab, dass von den erhobenen Standortsfaktoren nur die Sonneneinstrahlung, der pH-Wert und der Kaliumgehalt des Bodens einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Artenzusammensetzung der Vegetation ausüben.

Durch diese drei Standortsfaktoren konnten 21.3% der Variabilität des Datensatzes erklärt werden. Hiervon wurden 7.5% allein durch die Sonneneinstrahlung erklärt, 7.0% durch den pH-Wert, 5.8% durch den Kaliumgehalt des Bodens, und 1.0% wurde durch zwei oder drei der Faktoren gleichzeitig erklärt. Dies zeigt, dass die nach der hier vorgestellten Methode berechnete Sonneneinstrahlung im vorliegenden Ökosystem der wichtigste Standortfaktor zur Erklärung der Unterschiede in der Arten-

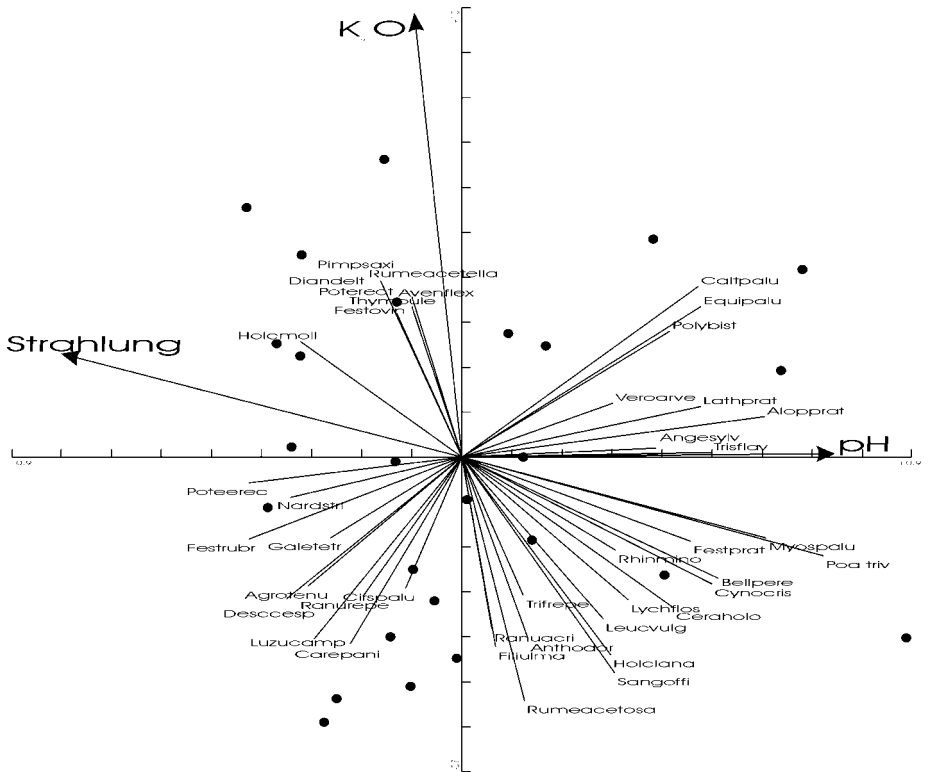


Fig. 3. Ordinationsdiagramm zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Standortsfaktoren direkte Sonneneinstrahlung (mittlere tägliche Strahlungssumme im Mai, berechnet mit dem Programm DACHRad), Boden-pH und Kaliumverfügbarkeit und dem Vorkommen von häufigen Pflanzenarten in Mittelgebirgswiesen und Wiesenbrachen im Landkreis Wunsiedel (Oberfranken, D). Die Ordination erfolgte mittels Redundanzanalyse von 26 Vegetationsaufnahmen; diese sind im Diagramm durch Punkte dargestellt. Arten deren Pfeil in ähnliche Richtung wie ein bestimmter Standortsfaktor zeigt waren bei hohen Werten dieses Faktors durchschnittlich häufiger als bei niedrigen Werten.

zusammensetzung der Vegetation ist. Weitere Redundanzanalysen wiesen für die Exposition alleine keinen signifikanten Einfluss auf die Vegetation nach, während die Hangneigung zwar einen signifikanten Einfluss hatte, aber nur 3.5% der Variabilität der Artenzusammensetzung erklärte. Die Sonneneinstrahlung erklärte die Artenzusammensetzung also wesentlich besser als die Neigung.

Im Ordinationsdiagramm in Fig. 3 zeigt der Pfeil der Sonneneinstrahlung nach links. Aufnahmen, die links im Diagramm liegen, sind demnach stärker sonnenexponiert als Aufnahmen, die rechts im Diagramm liegen. Nach links zeigen die Pfeile der Pflanzenarten, die im untersuchten Datensatz trockenere Standorte bevorzugen, wie *Nardus stricta*, *Potentilla erecta* und *Festuca rubra*. In der entgegengesetzten Richtung, also rechts, finden sich dagegen die Arten der Nasswiesen, wie *Caltha palustris*, *Equisetum palustris* oder *Myosotis palustris*. Ebenfalls nach rechts zeigt der Pfeil des pH-Wertes. Entlang der ersten Achse erstreckt sich ein Feuchte- und Säuregradient von den trockenen, sauren Wiesen, die zu den *Nardetalia* vermitteln, hin zu den nassen und basenreicheren *Calthion*-Wiesen.

Diskussion

Zur Berechnung der direkten Sonnenstrahlung muss die Position der Sonne relativ zur Erde bekannt sein. Hierzu liegen hinreichend genau Formeln vor, die die tatsächliche Form der Erdbahn, nämlich eine Ellipse, berücksichtigen. Dennoch wird oft von einer einfachen Kreisbahn ausgegangen (z.B. Volk 1998; Formel 7 im Anhang). Eine Berechnung der Deklination mit Formel (1) jedoch erfolgt ohne Mehraufwand nach einer realistischen Beschreibung der Erdbahn und ist deshalb Formel (7) vorzuziehen.

Der zeitliche Verlauf der Intensität der direkten Sonneneinstrahlung auf die zum Strahlengang normale Ebene lässt sich mit verschiedenen Verfahren simulieren. Garnier & Ohmura (1968), Funk (1983) u.a. beschreiben die Extinktion der Strahlung mittels des Transmissionskoeffizienten, wie in Formel (8) im Anhang dargestellt ist. Dieses Verfahren liefert für Zenitwinkel bis max. 70° näherungsweise genügend genaue Werte. Für größere Zenitwinkel, d.h. für die Morgen- und Abendstunden, wird die optische Luftmasse unterschätzt, da die Krümmung der Erdoberfläche nicht berücksichtigt ist. Daher liefert die Funktion für diese Zeiten zu geringe Strahlungsintensitäten. Einen sehr ähnlichen Ansatz benutzt auch Volk (1998). Auch hier wird über eine Exponentialfunktion die Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit des Transmissionskoeffizienten τ , der optischen Luftmasse $m(t)$ und der Meereshöhe z modelliert. Die Approximation der optischen Luftmasse erfolgt hier allerdings mit der verbesserten Formel (9) im Anhang, die die optische Luftmasse für große Zenitwinkel genauer beschreibt.

Einfache Modelle wie die nach Formel (8) oder (9) auf der Basis des Transmissionskoeffizienten nehmen implizit an, dass die Atmosphäre der Erde räumlich wie zeitlich homogen ist. Diese grobe Vereinfachung erlaubt es, die Modelle weltweit einzusetzen. In Gebieten, in denen es keine oder zu wenig Messungen der direkten Sonnenstrahlung gibt, um die klimatologischen Besonderheiten der Region zu berücksichtigen, sind solche Modelle durchaus angebracht. Sie können allerdings regionaltypische Wetterlagenabhängigkeiten nicht berücksichtigen. Im Mitteleuropa zeigt sich im Winter häufig eine Hochnebeldecke direkte Sonneneinstrahlung verhindert wird. Nachmittags löst sich der

Hochnebel dann häufig auf und ermöglicht eine Einstrahlung. Die umgekehrte Situation zeigt sich im Sommer, wo häufig morgens noch schönes Sonnenwetter herrscht, nachmittags aber aufgrund von Sommergewittern keine direkte Einstrahlung stattfindet. Diese Beispiele zeigen, dass es regionaltypische, tages- und jahreszeitliche Variationen der Eigenschaften der Atmosphäre gibt, die die eben diskutierten Modelle nicht berücksichtigen können.

Kompliziertere Modelle, die die physikalischen Prozesse der Schwächung der Sonneneinstrahlung bei Durchgang durch die Atmosphäre direkt modellieren, können auch jahreszeitliche und regionale Unterschiede der atmosphärischen Extinktion erfassen. Dieser Ansatz wurde von Kunz (1983) gewählt. Da die Absorption von Strahlung stark wellenlängenabhängig ist, führt dieses Verfahren zu sehr komplizierten rechenaufwendigen Formeln mit einer Vielzahl von Parametern, deren tages- und jahreszeitliche Variabilität bekannt sein muss. Die für diese Modelle erforderlichen zahlreichen Parameter sind allerdings nicht generell verfügbar. Aufwendige Messkampagnen sind daher zur Kalibrierung erforderlich. Dies verhindert in der Praxis meist ihre Anwendung.

Einen Kompromiss zwischen diesen beiden extremen Ansätzen stellt die statistische Analyse vorhandener Messungen dar, wie sie in der vorliegenden Arbeit propagiert wird. Auf der Basis von Daten in Müller (1984) und Kasten *et al.* (1984) wurde ein Modell zur Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung entwickelt, das an die regionalen Gegebenheiten der Westalpen und Deutschlands angepasst ist. Das Modell DACHRad besteht für den Alpenraum aus einer polynomialen Regression mit der Meereshöhe sowie der Tages- und Jahreszeit als unabhängigen Faktoren. Die Strahlung im Flachland wird

auf der Basis des Linke-Trübefaktors modelliert, dessen zeitliche Variabilität mit einer Fourier-Transformation beschrieben wird. Dieses kombinierte Modell beruht zwar auf Messungen in den Schweizer Alpen aus Höhen zwischen 1500 m und 4000 m, ist für den benachbarten Österreichischen Alpenraum aber sicherlich auch anwendbar. Damit stehen die Grundlagen zu Verfügung, um die direkte Sonneneinstrahlung im gesamten zentral-europäischen Raum auch unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten der Transmissionseigenschaften der Atmosphäre zu modellieren.

Die multivariate Analyse eines Datensatzes von Mittelgebirgswiesen zeigte, dass die nach der hier beschriebenen Methode berechnete Sonneneinstrahlung in diesem Ökosystem ein wichtiger Standortfaktor ist, um die floristische Struktur, einen Gradient von trockenen, sauren *Nardetalia*-Magerwiesen zu frischen bis nassen *Polygono-Trisetion*- und *Calthion*-Wiesen, zu erklären. Die ökologische Bedeutung der berechneten direkten Sonnenstrahlung ist zum einen die thermische Charakterisierung des Standorts. Auf der anderen Seite beeinflusst sie aber auch über die Verdunstung die Feuchteverhältnisse. Dies ist überall dort zu erwarten, wo die Vegetation unabhängig von Grund- und Stauwassereinflüssen ist. Mit den hier vorgestellten Berechnungen ist es also möglich zwei Standortfaktoren zu beschreiben, die sonst nur mit aufwendigen, langwierigen Messreihen zu erfassen sind.

Ein EDV-Programm HORIZ zur Berechnung der Horizontüberhöhung auf der Basis eines digitalen Geländemodells, sowie ein Programm DACHRad zur Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung ist auf Anfrage beim ersten Verfasser erhältlich.

Literatur

- Fischer, H.S. (1990) Simulating the distribution of plant communities in an alpine landscape. *Coenoses*, 5, 37–43.
- Fischer, H.S. (1994) Simulation der räumlichen Verteilung von Pflanzengesellschaften auf der Basis von Standortskarten. Dargestellt am Beispiel des MaB-Testgebiets Davos. *Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts ETH, Stiftung Rübel, Zürich*, 122, 1–143.
- Fischer, H.S. (1999) Auswirkungen des Bayerischen Vertragsnaturschutzprogramms auf die Vegetation von Feuchtgrünland. *Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, München*, 150, 67–84.
- Funk, M. (1983) Berechnung der Globalstrahlung auf der Basis eines digitalen Geländemodells. *Berichte und Skripten, Geographisches Institut der ETH Zürich*, 15, 1–60.
- Funk, M. (1985) Räumliche Verteilung der Massenbilanz auf dem Rhonegletscher und ihre Beziehung zu Klimatelementen. *Zürcher Geographische Schriften*, 24, 1–183.
- Garnier, B.J. & Ohmura, A. (1968) A method for calculating the direct short wave radiation income on a slope. *Journal of Applied Meteorology*, 7, 796–800.
- Gilgen, H., Steiger, D. & Fischer, H.S. (1988) Horizontbestimmung in einem digitalen Geländemodell. Computerprogramm. *Berichte und Skripten, Geographisches Institut der ETH Zürich*, 37, 1–20.
- Kasten, F., Dehne, K., Behr, H.D. & Bergholter, U. (1984) Die räumliche und zeitliche Verteilung der diffusen und direkten Sonneneinstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland. *BMFT Forschungsbericht, T 84-125*, 1–128.
- Kunz, S. (1983) Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung in regionalem Maßstab. *Geographica Bernensia*, 19, 1–89.
- Lindacher, R. (1996) Verifikation der potentiellen natürlichen Vegetation mittels Vegetationssimulation am Beispiel der TK 6434 «Hersbruck». *HOPPEA, Denkschrift der Regensburgischen Botanischen Gesellschaft*, 57, 5–143.
- Michler, B. & Arnold, C.-G. (1996) Pyrrolizidinalkaloide in Beinwellwurzeln. Ein Beispiel für die Variabilität sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe. *Deutsche Apotheker Zeitung*, 136/29, 15–20.
- Müller, H. (1984) Zum Strahlungshaushalt im Alpenraum. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, 71, 1–167.
- Schaab, G. (2000) Modellierung und Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Einstrahlungsstärke mittels eines Geo-Informationssystems. *Kartographische Bausteine, TU Dresden*, 17, 1–160.
- Schaab, G. & Lenz, R. (1998) Modellierung der Sonneneinstrahlung in einem GIS: das «Solar Radiation Model» (SORAM). *GIS*, 4, 8–14.
- Ter Braak, C. J. F. (1988) *CANOCO – a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis*. *GLW Technical report: LWA-88-02*. Wageningen.
- Ter Braak, C. J. F. (1990) *Upgrade notes: CANOCO Version 3.10*. Wageningen.
- Tich, L. (1999) Predictive modeling of the potential natural vegetation pattern in the Podyji National Park, Czech Republic. *Folia Geobotanica*, 34, 243–252.
- Volk, G. (1998) *RADCALC*. <http://bzgserver.boku.ac.at/volk/radcalc1/index.htm>.

*Erhalten 10. September 2001
Angenommen 12. Juni 2002*

Elektronischer Anhang

Anhang 1. Formeln zur Berechnung der direkten Sonneneinstrahlung.

Erhältlich als PDF-Datei unter

<http://www.geobot.umnw.ethz.ch/publications/periodicals/bulletin.html>

(dort 'Electronic Appendices', App. 2001-2, wählen).