

## Abschätzung des Strahlungsklimas geneigter Flächen durch hemisphärische Photographien am Beispiel des NSG Hundsbachtal / Eifel

Estimation of the radiation receipts on slopes using hemispherical photographs - an example from the Hundsbach Valley / Eifel (FRG)

JÖRG WUNDER

**Kurzfassung:** Anhand hemisphärischer Photographien von drei Blockhalden im NSG Hundsbachtal/Eifel wird gezeigt, wie sich mit Hilfe eines Sonnenstanddiagramms abschätzen läßt, wann, wie lange und in etwa welchem Winkel eine Untersuchungsfläche von der Sonne bestrahlt werden kann. Neben einer ausführlichen Erläuterung des Verfahrens selbst, werden weitergehende Auswertungsmöglichkeiten unter Einbeziehung meteorologischer Daten diskutiert. Zusätzlich durchgeführte Temperatur- und Evaporationsmessungen zeigen gute Korrelationen zu den ermittelten Strahlungsdaten. Aufgrund des geringen Aufwandes, der guten Reproduzierbarkeit und der objektiven Beurteilungsmöglichkeit hemisphärischer Photographien, erscheint die Methode geeignet, dem bislang etwas vernachlässigten Standortfaktor Strahlung bei vegetationsökologischen Untersuchungen zu mehr Aufmerksamkeit zu verhelfen.

**Schlagworte:** hemisphärische Photographien, Strahlungsklima, Mikroklima, Vegetationsökologie

**Abstract:** A discussion of hemispherical photographs of three rock debris from the nature reserve Hundsbachtal/Eifel shows that this technique allows objective and relatively precise assessments of the radiation climate of sites with different slopes and aspects. By use of a solar track diagram it is possible to estimate very quickly when, for how long, and at what angle a site is exposed to the sun. Besides a description of the technique itself, a more detailed interpretation providing information about the approximate magnitude of direct and diffuse irradiance of longer periods is discussed. Additional measurements of temperature and evaporation show good correlation with the radiation data revealed by the hemispherical photographs. Because of the rapid and simple nature of this method and its good reproductivity and objectivity, hemispherical photographs seem to be quite useful to investigate radiation climate in studies of vegetation ecology.

**Key words:** hemispherical photographs, radiation climate, microclimate, vegetation ecology

### 1. Einleitung

"Unter allen meteorologischen Elementen nimmt unzweifelhaft die Strahlung den ersten Rang ein..." (GEIGER 1961). Sie stellt die Energie zur Photosynthese zur Verfügung und hat wesentlichen Einfluß auf die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse eines Standortes und damit auf seine Vegetation. Das Strahlungsklima wird außer durch die geographische Breite, Tages- und Jahreszeit v.a. durch Exposition und Neigung bestimmt. Außerdem spielen Abschirmungen der Sonneneinstrahlung durch z. B. Bäume oder Felsen eine Rolle. Exposition und Neigung sind von besonderer Bedeutung, da sie den Winkel des einfallenden Lichtes und somit die Menge der eingestrahnten Energie pro Fläche ( $W/m^2$ ) bestimmen. Eine  $20^\circ$  nach Süden geneigte Fläche erhält im Laufe des Januars, auch wenn man die starke Bewölkung in Deutschland mitberücksichtigt, beispielsweise rund doppelt soviel direkte Sonneneinstrahlung wie eine horizontale Fläche (GEIGER 1961). Eine um  $30^\circ$  nach Norden geneigte Fläche dagegen erhält im März (Monatsmitte) nur ca. 15 % der Sonneneinstrahlung (Tagessumme) einer horizontalen Fläche (vgl. ROSENKRANZ 1951).

Die sichtbare, kurzweilige Strahlung (Licht) erreicht die Erdoberfläche als direkte Sonneneinstrahlung und als diffuse Himmelsstrahlung. Expositions- und Abschirmungseffekte sind für erstere von besonderer Bedeutung, während der Einfluß auf die diffuse Himmelsstrahlung sehr viel geringer ist. Mit zunehmender Abschirmung des Standortes von der Sonne, z. B. durch das Kronendach eines Waldes, nimmt jedoch auch die diffuse Himmelsstrahlung deutlich ab. Dies hat bei Waldökosystemen z. B. große jahreszeitliche Veränderungen des Strahlungsklimas zur Folge. Hemisphärische Photographien ermöglichen es, beide Strahlungstypen zu analysieren ("diffuse-site-" und "direct-site-factor", ANDERSON 1964). Wengleich in unseren Breiten die diffuse Himmelsstrahlung einen beträchtlichen Anteil an der gesamten kurzweiligen Strahlung stellt, ist für die an einem Standort auftretenden Maximaltemperaturen jedoch die direkte Sonneneinstrahlung entscheidend. Und häufig sind es eben die Extremwerte von Temperatur und

Trockenheit, die über das Vorkommen bestimmter Arten entscheiden. Im Folgenden liegt der Schwerpunkt daher auf einer Analyse der direkten Sonneneinstrahlung.

Häufig wird bei vegetationsökologischen Untersuchungen gerade das Strahlungsklima nur ungenügend beachtet. Während die Eigenschaften des Bodens und einzelne Tagesgänge von Temperatur und Feuchtigkeit meist untersucht werden, beschränkt sich die Darstellung des Strahlungsklimas oft auf die Angabe der geographischen Breite, Neigung und Exposition der Untersuchungsflächen. Es wird, wie auch bei Langzeit-Temperaturmessungen, wohl der vermeintlich hohe apparative und v.a. zeitliche Aufwand für Strahlungsmessungen gescheut. Gerade bei Extremstandorten hinsichtlich Exposition und Neigung, die zudem komplizierte Kombinationen von Einstrahlungswinkel und Sonnenabschirmung aufweisen können, wird somit leider oft ein wichtiger Faktor bei der Dokumentation des Standortes vernachlässigt. Insbesondere bei Blockhalden stellen solche Standorte jedoch eher die Regel als die Ausnahme dar.

Hemisphärische Photographien (EVANS & COOMBE 1959, ANDERSON 1964, PROCTOR 1980) stellen ein nützliches Verfahren dar, Strahlungsverhältnisse, insbesondere an stark geneigten Flächen, mit relativ geringem Aufwand zu dokumentieren und zu analysieren, werden jedoch in der Praxis bislang kaum angewendet.

Am Beispiel unterschiedlicher Blockhalden des NSG Hundsbusch/Eifel (KERSBERG 1968, WUNDER 1993, WUNDER & MÖSELER 1996) werden verschiedene hemisphärische Photographien dargestellt und erläutert sowie das Verfahren selbst beschrieben. Ergänzend hierzu werden zudem einige an denselben Meßstellen durchgeführte Temperaturmessungen und Evaporationsbestimmungen dargestellt.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Hemisphärische Photographien

Hemisphärische Photographien werden mit Super-Weitwinkelobjektiven, sog. "Fisheye-Objektiven", erstellt. Die Bilder zeigen einen runden Bildausschnitt und umfassen einen Blickwinkel von ca. 180°, wobei sie aufgrund der Polarprojektion solcher Objektive typischerweise extrem zur Bildmitte stürzende Linien aufweisen (vgl. Abb. 8).

Die vorliegenden Aufnahmen erfolgten mit einem Fisheye-Zusatzobjektiv (SOLIGOR fish-eye lens 0.15X), das auf ein Normalobjektiv (MINOLTA MD 50 mm, 1:1,7) aufgeschraubt wurde. Der verwendete Photoapparat war eine Spiegelreflex-Kamera vom Typ MINOLTA X-500, der verwendete Film ein ILFORD FP4plus (125 ASA).

#### 2.1.1. Erstellung der Photographie

Zur Erstellung einer hemisphärischen Photographie im Gelände wird die Kamera innerhalb der Untersuchungsfläche dicht über dem Boden mit Hilfe einer Wasserwaage horizontal ausgerichtet. Der Abstand der Frontlinse zur Bodenoberfläche sollte hierbei der Höhe der jeweils zu untersuchenden Vegetationsschicht entsprechen. Bei den vorliegenden Bildern betrug der Abstand ca. 20-30 cm (Höhe der Krautschicht).

Für die Auswertung der Photos ist eine Nord-Markierung im Bild notwendig. Hierzu wurde mit Hilfe eines Kompasses ein heller Stab nördlich der Kameraposition in den Boden gesteckt. Bei der späteren Auswertung muß die magnetische Nordabweichung korrigiert werden, zudem ist darauf zu achten, daß der Kompaß nicht durch im Photoapparat befindliche magnetische Teile beeinflusst wird.

Die Belichtung ist sicherlich der problematischste Teil bei der Erstellung eines hemisphärischen Photos. Um zu starke Überstrahlungen v.a. durch direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden, sollten die Photos bei gleichmäßig bedecktem Himmel aufgenommen werden. Die Belichtungszeit der vorliegenden Photographien wurde mit dem internen Belichtungsmesser der Kamera bestimmt, wobei jedoch nicht der Himmel, sondern die umgebende Vegetation gemessen wurde. Die Art und Weise der Belichtung wird insgesamt sehr uneinheitlich gehandhabt, eine kurze Zusammenstellung hierzu findet sich bei WAGNER (1994). Sollen verschiedene Photos miteinander verglichen werden, ist es wichtig, die Belichtungsmethode zu standardisieren (vgl. hierzu auch Abb. 8 sowie Abschnitt 4)!

#### 2.1.2. Auswertung der Photographie

Zur Auswertung der hemisphärischen Photographien werden diese mit verschiedenen Diagrammen, die unterschiedliche Informationen enthalten, überlagert.

### Bestimmung des Abschirmungsgrades

Zur Bestimmung des Abschirmungsgrades eines Standortes ("site-factor" ANDERSON 1964, "sky-view factor" PROCTOR 1980) bestimmt man den Anteil der über dem Standort liegenden unverdeckten Hemisphäre. Hierzu kann man z. B. ein Gitternetz, wie in Abb. 1 gezeigt, über das Photo legen und die Anzahl der Kästchen auszählen, die den Himmel zeigen.

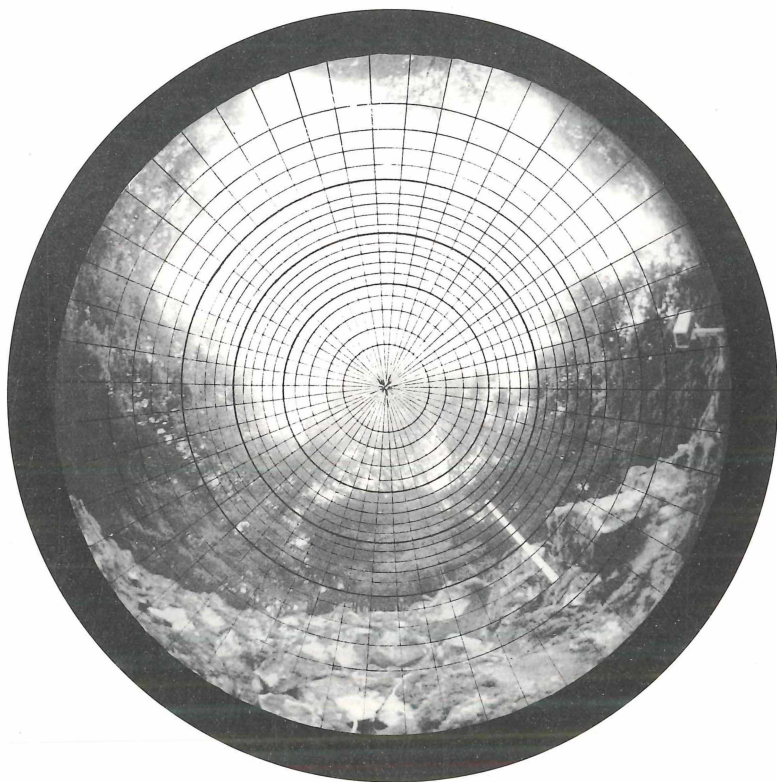


Abbildung 1. Offene Blockhalde, Exposition SSE, Hangneigung 30°, Aufnahme vom 10.7.1993  
Ein Kästchen des Gitternetzes entspricht 0,1 % der diffusen Einstrahlung eines standardbewölkten Himmels (vgl. ANDERSON 1964). Die Auszählung der Kästchen ergibt einen Abschirmungsgrad von 55 % ("site-factor"= 45 %).

Unter Zuhilfenahme von Scanner und Computer kann man ein solches Bild auch digitalisieren, in einzelne Pixel gewünschter Größe auflösen und die Anzahl der Pixel auszählen lassen. Die zu erzielende Auflösung wird hierdurch natürlich größer, ein Hauptproblem, insbesondere bei der Untersuchung von Waldökosystemen, bleibt jedoch bestehen: die Auswertung der verschiedenen Grauwerte durchstrahlter Blätter (vgl. hierzu Abschnitt 4 sowie WAGNER 1994).

Der Grad der Abschirmung ist insbesondere für die Bestimmung der diffusen Himmelsstrahlung sowie auch zur Beurteilung der Wärmeabstrahlung eines Standortes wichtig. Zur Berechnung werden die durch die Bilder erhaltenen Daten mit meteorologischen Modellen verknüpft, die z. B. Aussagen über die Bewölkungsintensitäten zu verschiedenen Jahreszeiten machen (vgl. z. B. OKER-BLOM 1986, CHAZDON et al. 1987, PRINCE 1987, BECKER et al. 1989).

## Bestimmung der direkten Sonneneinstrahlung

Die Analyse der direkten Sonneneinstrahlung erfolgt mit Hilfe eines Sonnenstanddiagramms (Abb. 2), das unter Berücksichtigung der Nordausrichtung in die fertige Photographie kopiert wird.

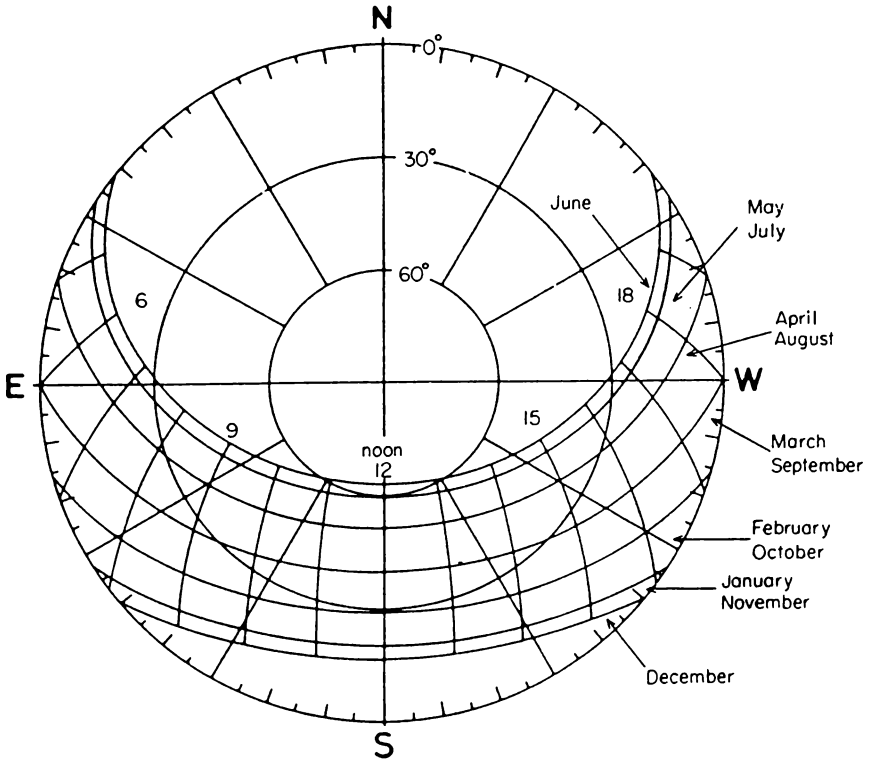


Abbildung 2. Sonnenstanddiagramm für die geographische Breite  $50^{\circ}30'N$  (nach PROCTOR 1980)

Der Rand und die konzentrischen Kreise stellen den Horizont sowie Höhen von  $30^{\circ}$  bzw.  $60^{\circ}$  über dem Horizont dar. Der Mittelpunkt des Diagramms kennzeichnet den Zenit. Entlang des Horizontes sind die Himmelsrichtungen sowie das Azimut in Intervallen von  $5^{\circ}$  angegeben. Die vom östlichen zum westlichen Horizont verlaufenden Kurven kennzeichnen den Sonnenstand am 22. eines jeden Monats. Die Monate Dezember und Juni haben eine eigene Kurve (Winter- und Sommersonnenwende), die übrigen Kurven repräsentieren jeweils zwei Monate (Mai/July, April/August usw.) Die +/- senkrecht zu den Sonnenstandkurven verlaufenden Linien geben die Tageszeit an (6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 Uhr).

Die Konstruktion eines solchen Sonnenstanddiagramms ("solar track diagram") wird z. B. von EVANS & COOMBE (1959) beschrieben. Abbildung 2 zeigt ein solches von PROCTOR (1980) konstruiertes Diagramm für die geographische Breite von  $50^{\circ}30'N$ .

Die Auswertung erfolgt durch Analyse der sog. Horizont-Einengungen. Jedes über dem Horizont befindliche Objekt engt den Einstrahlungsbereich ein und bedeckt auf dem Photo einen Teil der Diagrammfläche. Ein im Süden, Osten oder Westen und damit im Bereich der Sonnenstandkurve befindlicher Gegenstand, z. B. ein Fels oder Baum, hat somit eine zeitweilige Abschirmung der direkten Sonneneinstrahlung zur Folge. Ist der untersuchte Hang geneigt, so erfolgt eine der Stärke der Neigung entsprechende flächige Horizont-Einengung. Diese zeigt sich im Diagramm auf der der Expositionsrichtung

entgegengesetzten Seite. Bei stärker geneigten Hängen lassen sich sowohl Exposition als auch (näherungsweise) die Hangneigungen aus dem Diagramm entnehmen. Abb. 3 zeigt beispielsweise einen SSE-exponierten Hang, Abb. 7 einen NNW-exponierten Hang; beide haben eine Neigung von ca. 30-35°.

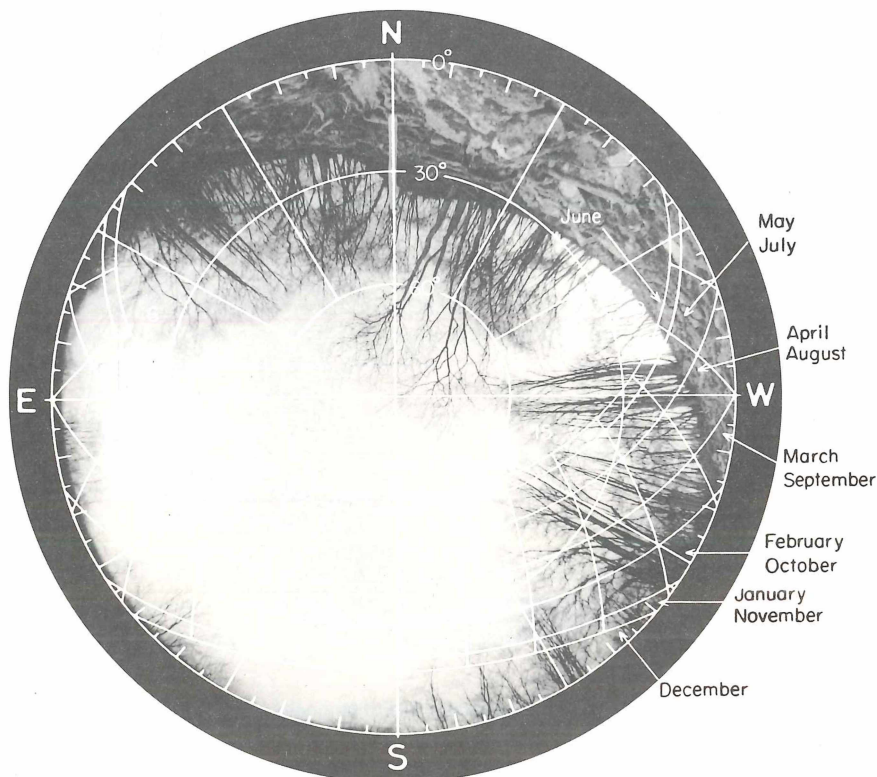


Abbildung 3. Offene Blockhalde, Exposition SSE, Hangneigung 30°, 21.4.1993

Die eigentliche Auswertung besteht darin, mit Hilfe der Sonnenstandkurven Aussagen über die Position der Sonne für jeden beliebigen Zeitpunkt des Jahres zu machen. Bei gegebenen Horizont-Einengungen läßt sich somit abschätzen, wann ein Standort im Schatten liegt, wann er von Sonnenstrahlen erreicht werden kann und wie lange die potentielle Einstrahlung dauert.

Zudem läßt sich aus dem Diagramm auch der jeweilige Einstrahlungswinkel der Sonne abschätzen. Der Schnittpunkt der konzentrischen Kreise (Höhe über dem Horizont) mit den Sonnenstandkurven gibt den jeweiligen Einstrahlungswinkel zu gegebener Tages- und Jahreszeit an. Am 22. Mai um 12:00 Uhr beispielsweise (Abb. 4) steht die Sonne in einem Winkel von 60° über dem Horizont, am 22. Juni wird dieser Winkel bereits um 11:00 Uhr erreicht. Am 22. Januar um 10:00 Uhr beträgt er dagegen nur 15°. Diese Werte gelten für die Bestrahlung einer horizontalen (!) Fläche. Um den tatsächlichen Einstrahlungswinkel bei gegebener Hang-Neigung und Exposition zu bestimmen, muß der Winkel des jeweiligen Sonnenstandes mit dem der Hangneigung sowie der Exposition verrechnet werden. Dies sei am Beispiel des Hanges in Abb. 3 kurz erläutert: Die Neigung des Hanges beträgt ca. 30°, die genaue Exposition ist SSE. Am 22. Juni um 11:00 Uhr steht die Sonne im Südosten und damit dem Hang genau gegenüber. In diesem Fall werden Sonnenstand (60°) und Hangneigung einfach addiert. Es ergibt sich somit ein Einstrahlungswinkel von  $60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$ . Der Einstrahlungswinkel z. B. um 10:00 Uhr im Januar läßt sich auf die gleiche Weise berechnen:  $15^\circ + 30^\circ = 45^\circ$ .



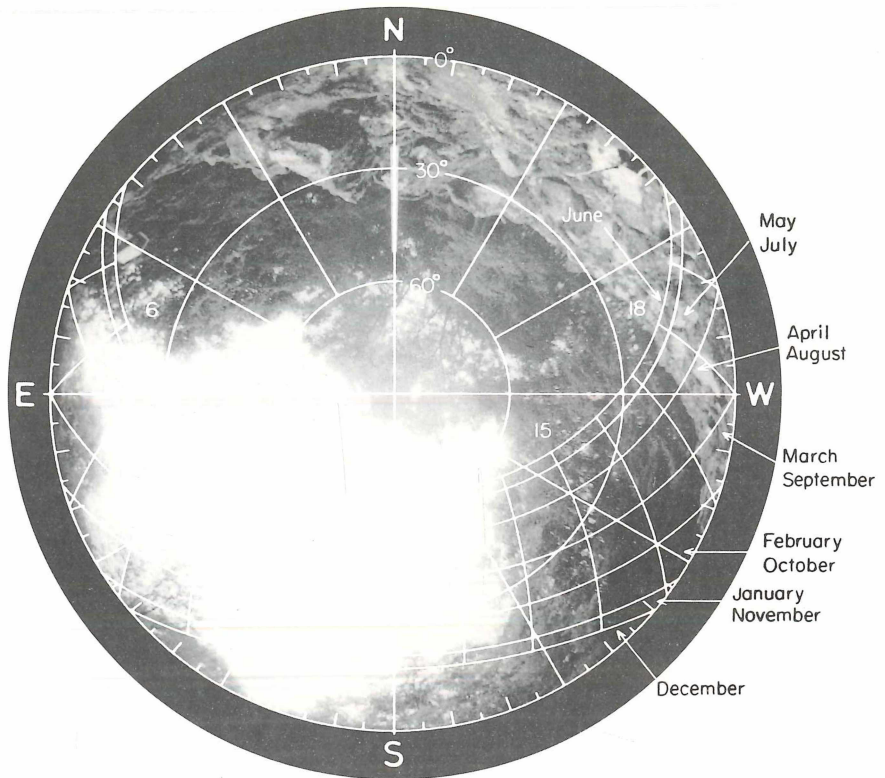


Abbildung 4. Offene Blockhalde, Exposition SSE, Hangneigung 30°, 10.7.1993

Bei nördlich exponierten Hängen liegen Sonnenverlauf und Horizont-Einengung auf derselben Seite des Diagramms; in diesem Fall werden die Winkel subtrahiert. Betrachtet man z. B. den NNW exponierten Hang in Abb. 7, so ergibt sich bei einer Hangneigung von 35° für den 22. Juni um 11:00 Uhr ein Einstrahlungswinkel von nur 25° ( $60^\circ - 35^\circ = 25^\circ$ ). Um 10:00 Uhr im Januar liegt der Hang vollständig im Schatten.

Befindet sich die Sonne dem Hang nicht direkt gegenüber, sondern bescheint ihn seitlich, so muß bei der Berechnung des Einstrahlungswinkels dies zusätzlich berücksichtigt werden, da der Winkel sich entsprechend verringert (vgl. hierzu z. B. MONTEITH 1973).

Bezieht man zudem noch meteorologische Daten über das Gebiet in die Auswertung mit ein, z. B. durchschnittliche Sonnenscheindauer, durchschnittliche Bewölkungsdichte usw., so lassen sich sogar Einstrahlungsenergien in  $W/m^2$  abschätzen (Beispiele hierfür finden sich z. B. bei PROCTOR 1980).

## 2.2. Temperaturmessungen

Die Temperaturmessungen der bodennahen Luftschichten erfolgten mit automatisch aufzeichnenden Meßgeräten der Firma GRANT-INSTRUMENTS, sog. "Squirell meter/logger" (Typ SQ8-3U/1L bzw. SQ32-16U). Als Temperaturfühler dienten Minithermistor-Temperatursonden.

Die Meßfühler befanden sich jeweils in drei verschiedenen Positionen:

1. - in 20 cm Höhe, Meßfühler in einem Strahlungsschutz
2. - innerhalb eines Moospolsters auf einem Basaltblock
3. - in einem luftegefüllten Raum zwischen Basaltblöcken

Das Meßintervall betrug 15 bzw. 30 Minuten, Bezugszeit ist MEZ.

### 2.3. Evaporationsmessungen

Die Evaporationsmessungen erfolgten mit Evaporimetern nach Piché nach der Anleitung von STEUBING & FANGMEIER (1992). Die grüne Filtrierscheibe wurde jeweils in einem Abstand von ca. 3 cm über den Moospolstern ausgerichtet. Das Ablesen des Wasserstandes in den Röhrchen erfolgte etwa alle 60 Minuten, von ca. 8:00-19:00 Uhr.

## 3. Ergebnisse

### 3.1. SE-exponierte offene Blockhalde

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen hemisphärische Photos einer unbewaldeten (offenen) Blockhalde im NSG Hundsbachtal. Der Hang ist nach SSE exponiert und weist eine Neigung von ca. 30° auf. Hangneigung und Exposition lassen sich besser bei unbelaubten Bäumen (Abb. 3) erkennen, sollten aber unbedingt auch direkt vor Ort erhoben werden.

Der offene Haldenbereich liegt innerhalb eines bewaldeten Hanges und erstreckt sich hangparallel auf etwa 100 m mit einer Breite von nur ca. 20 m. Aufgrund der Kameraposition etwa im Zentrum der Halde lassen sich auf dem Photo sowohl die oberhalb der offenen Halde stehenden Bäume erkennen (ein überhängender Baum reicht auf dem Photo sogar bis in das Mittelkreuz des Bildes), als auch am linken unteren Rand die Wipfel der unterhalb des offenen Bereiches stehenden Bäume bzw. der gegenüberliegende Hang des Schluchttales (vgl. Abb. 5).

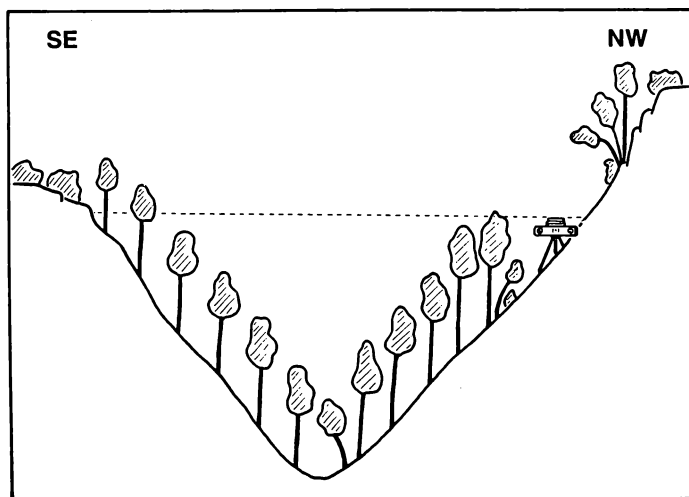


Abbildung 5. Schematischer Talquerschnitt zur Veranschaulichung des Kamerastandpunktes in Abb. 3 u. 4. Die gestrichelte Linie stellt den Blickwinkel des Fisheye-Objektivs dar. Die Neigung ist um 50 % überhöht dargestellt.

Folgt man den Sonnenstandkurven unter Beachtung der Horizont-Einengungen, so lassen sich die Strahlungsverhältnisse wie folgt beschreiben:

Im Winter (Abb. 3) erscheint die Sonne bereits kurz nach Sonnenaufgang über der Hangkante des gegenüberliegenden Hanges; die dünnen Äste beeinträchtigen die Einstrahlung kaum. Bis etwa 14:00 Uhr wird sie durch keinerlei Hindernisse abgeschirmt. Während des Nachmittages erfolgt jedoch eine rasch wechselnde Beschattung durch links oberhalb (im SW) der Fläche befindliche Bäume und Sträucher, die v.a. von November bis Februar die Einstrahlung erheblich verringern. Im März und April schirmt gegen 17:00 Uhr schließlich der Hang selbst die Sonne vollständig ab. Der Einstrahlungswinkel liegt um die Vormittags- und Mittagsstunden fast immer über 40° bzw. 50° und ist somit für die Winterzeit sehr groß.

Im Sommer (Abb. 4) wird die direkte Sonneneinstrahlung durch die links oberhalb der Fläche stehenden Bäume nachmittags ab ca. 14:00 Uhr fast vollständig abgeschirmt. Nur während 2/3 der potentiellen Einstrahlungszeit im August liegt der Hang also tatsächlich in der Sonne. In den späten Vormittags- und während der Mittagsstunden erfolgt die Einstrahlung unter sehr stumpfem Winkel. Er liegt zwischen 60° und 90° und erreicht damit äquatoriale Werte. "Der Südhang ist hinsichtlich des Strahlungsgenusses (...) weit äquatorwärts verschoben" (GEIGER 1961). Die eingestrahlte Energiemenge ist während dieser Zeit sehr groß und der Hang erwärmt sich daher sehr stark, zeitweise bis auf 50°C (WUNDER 1993). Die Vegetation der Halde wird ausschließlich von Kryptogamen bestimmt, höhere Pflanzen fehlen vollständig (vgl. WUNDER 1993, WUNDER & MÖSELER 1996).

Abb. 6b zeigt den Temperatur- und Evaporationsverlauf auf diesem Hang an einem typischen Sommertag im August. Die Maximalwerte von Temperatur (> 40°C in den auf den Felsblöcken befindlichen Moospolstern, 25-30°C die Luft in 20 cm darüber) und Evaporation liegen zwischen 10:00 und 14:00 Uhr und sind v.a. durch die großen Einstrahlungswinkel zu erklären. Bereits um 10:00 Uhr morgens liegt er bei 75° und verursacht die hohen Werte zu dieser noch relativ frühen Tageszeit. Zwischen 10:00 und 13:00 Uhr beträgt der Winkel durchweg 75 -80°! Sobald die Sonne gegen 13:45 Uhr durch das Blätterdach verdeckt wird, fällt die Temperatur an beiden Meßpositionen sofort stark ab, die Evaporationsrate verringert sich entsprechend.

### 3.2. NW-exponierte offene Blockhalde

Abbildung 7 zeigt das hemisphärische Photo (Sommeraspekt) einer NNW-exponierten offenen Blockhalde. Sie befindet sich wiederum innerhalb eines ansonsten bewaldeten Hanges, die Ausdehnung ist mit der zuvor beschriebenen vergleichbar. Da die Position der Kamera in diesem Fall im unteren Viertel der Halde liegt, lassen sich im oberen Teil des Bildes sehr deutlich die Kronen der unterhalb des offenen Bereiches stehenden Bäume erkennen.

Anhand des Sonnenstanddiagrammes lassen sich die Strahlungsverhältnisse wie folgt beschreiben:

Im Winter, während der Monate November bis Januar, erreicht die Sonne den Hang gar nicht. Im Februar erscheint sie nachmittags und je weiter das Jahr fortschreitet, desto früher gelangen Sonnenstrahlen auf den Hang. Größere Einstrahlungsenergien werden jedoch erst in den Nachmittagsstunden erreicht, wenn der Einstrahlungswinkel stumpfer wird. Gegen Abend wird die Sonne vom gegenüberliegenden Hang verdeckt.

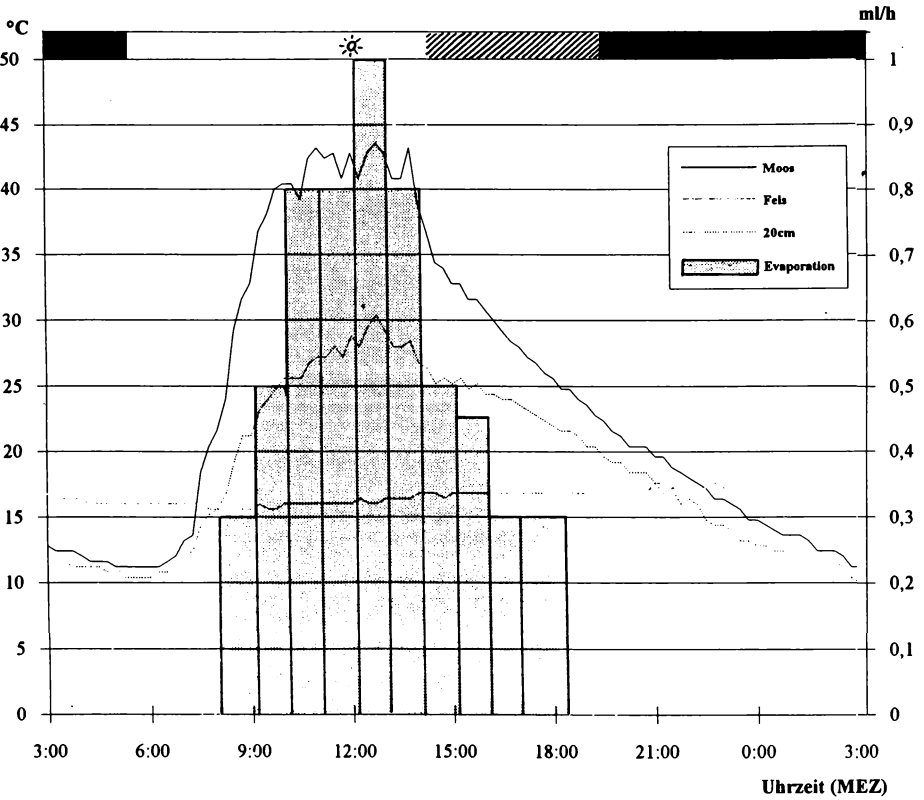
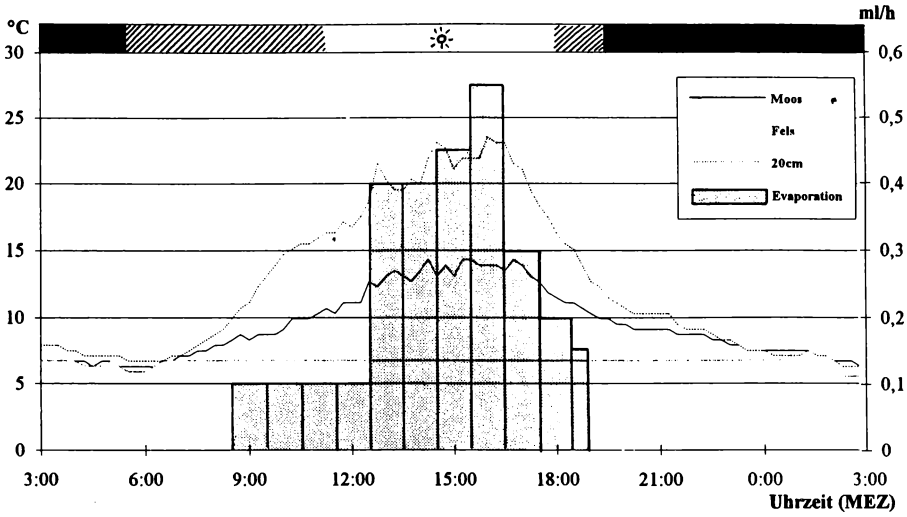
Im Sommer ändern sich die Einstrahlungszeiten kaum. Der höhere Sonnenstand wird durch eine höhere Hangkante, verursacht durch die nun vorhandene Belaubung der dort wachsenden Bäume, ausgeglichen. Er führt jedoch zu einem stumpferen Einstrahlungswinkel, wodurch die eingestrahlte Energie zunimmt.

Insgesamt erhält der NNW-exponierte, offene Hang eine deutlich geringere Sonneneinstrahlung als der offene SSE-exponierte Hang.

Abbildung 6. Temperaturverlauf und Evaporationsraten an einem typischen Sommertag im August, 19.8.1993 (Abb. 6a: NNW-exponierte offene Blockhalde, Abb. 6b: SSE-exponierte offene Blockhalde)

„Moos“ bezeichnet den im Moospolster steckenden Temperaturfühler, „Fels“ den im Felszwischenraum befindlichen, „20 cm“ den in 20 cm Höhe in einem Strahlungsschutz angebrachten Fühler. Über jeder Abbildung befindet sich ein Balken, in dem zur besseren Orientierung Tag und Nacht sowie grob der Wassertyp dargestellt ist. Die schwarzen Bereiche stehen für Nacht, die weißen für Tag. Die Grenzen geben die ungefähren Sonnenauf- bzw. -untergangszeiten an (MEZ). Die schraffierten Bereiche kennzeichnen Tageszeiten, zu denen die Meßstation vollständig von der Sonne abgeschirmt ist. Das Meßintervall betrug 15 Minuten.  
(siehe nebenstehende Seite →)





Unter Einbeziehung meteorologischer Daten lassen sich auf der Grundlage hemisphärischer Photographien auch Einstrahlungsenergien für bestimmte Zeiträume wie einen Tag, Monat oder ein Jahr abschätzen. Wie genau solche Berechnungen sind, hängt davon ab, welche weiteren Daten zur Auswertung zur Verfügung stehen und wie zuverlässig (bezogen auf das jeweilige Untersuchungsgebiet) diese sind. So ermöglichen Strahlungsmessungen für horizontale, unbeschattete Flächen, wie sie z. B. von einigen Wetterstationen oder meteorologischen Instituten durchgeführt werden, unter Einbeziehung von Exposition und Neigung die Berechnung von potentiellen Einstrahlungsenergien in  $W/m^2$ . Die Berücksichtigung von Daten zur durchschnittlichen Bewölkungsdichte erlauben es, die Aussagen weiter zu verfeinern. Je mehr Daten zur Verfügung stehen, umso genauere Aussagen über den Standort lassen sich treffen und umso interessanter können vergleichende Betrachtungen sein.

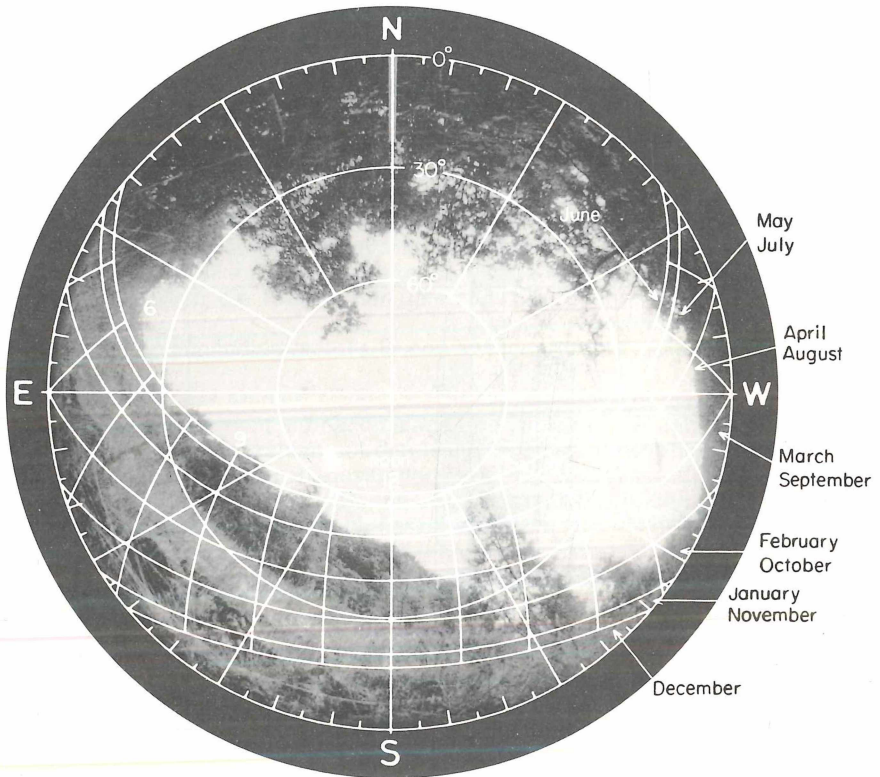


Abbildung 7. Offene Blockhalde, Exposition NNW, Hangneigung 35°, 10.7.1993

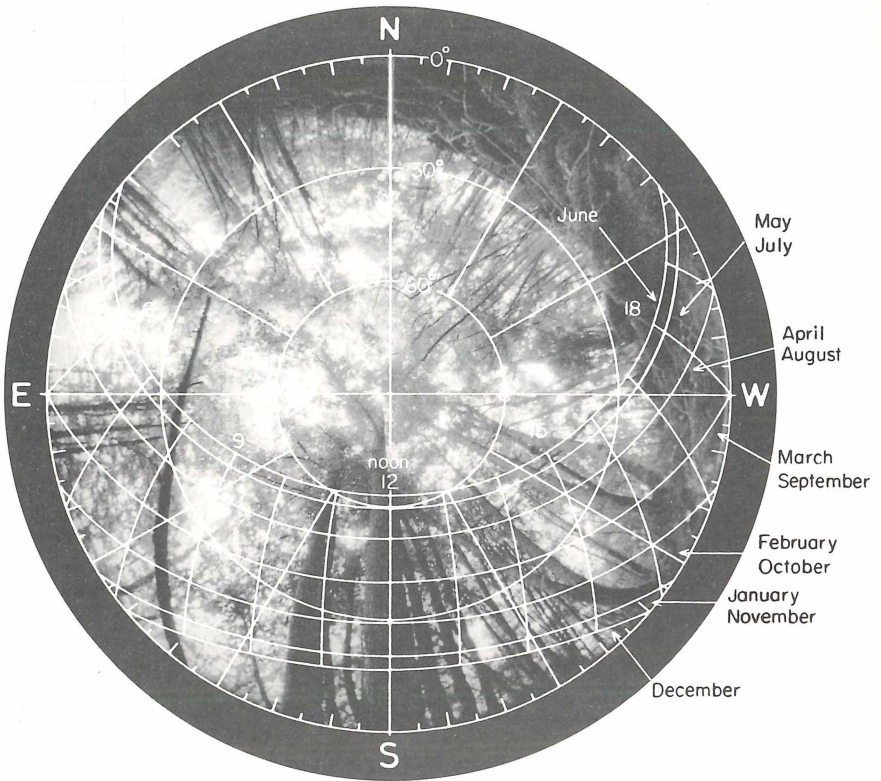


Abbildung 8. Bewaldete Blockhalde, Exposition SE, Hangneigung 30°, 10.7.1993

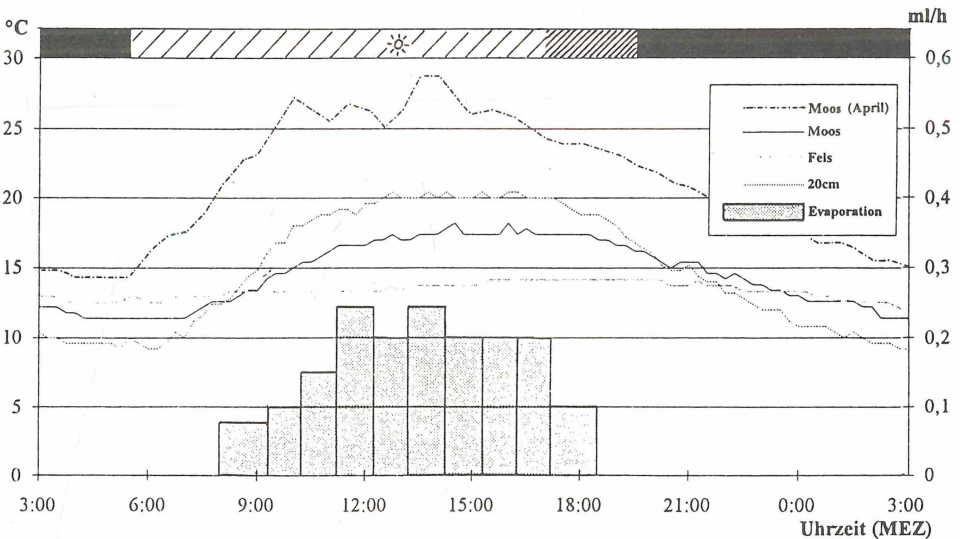


Abbildung 9. Temperaturverlauf und Evaporationsrate auf der bewaldeten SE-exponierten Blockhalde an einem typischen Sommertag im August, 19.8.1993 (Meßintervall 15 Min.) sowie die im Moospolster gemessenen Temperaturen vom 30.4.1993 (Meßintervall 30 Min.). Legende siehe Abb. 6

Betrachtet man den Temperaturverlauf und die Evaporationsraten (Abb. 6a), so zeigt sich eine deutliche, den Einstrahlungszeiten und -winkeln entsprechende Verschiebung der Maxima zum Nachmittag, bei gleichzeitig deutlich niedrigeren Temperaturen (s. u.). Zwischen 13:15 Uhr und 14:00 Uhr zeigt die „20 cm“ Kurve zudem den Einfluß der zeitweisen Beschattung durch die rechts unten im Bild (Abb. 7) befindliche Birke. Aufgrund der zeitweiligen Abschirmung der Sonne, zum einen durch den Hang selbst, zum anderen durch die oberhalb wachsenden Bäume, wird diese Fläche somit nur in knapp 50 % der potentiellen Einstrahlungszeit tatsächlich von der Sonne beschienen. Die insgesamt geringeren Temperaturen sind somit zum einen auf die geringen Einstrahlungszeiten und -winkel zurückzuführen, zum anderen jedoch auch auf einen Standortfaktor, der durch eine Analyse des Strahlungsklimas nicht erfaßt wird: auf der untersuchten Blockhalde tritt in diesem Bereich an verschiedenen Stellen Kaltluft aus. Diese führt zu den für einen Hochsommertag insgesamt sehr niedrigen Temperaturen insbesondere im Moospolster und zwischen den Blöcken („Fels“) und bedingt zudem die Umkehr der Temperaturkurven „Moos“ und „20 cm“ im Vergleich zu Abb. 6b (Eine genauere Erläuterung dieses Phänomens findet sich bei WUNDER & MÖSELER 1996.).

### 3.3. SE-exponierte bewaldete Blockhalde

Abbildung 8 zeigt eine hemisphärische Photographie (Sommeraspekt) im bewaldeten Bereich der SE-exponierten Talseite. Der Hang weist in diesem Bereich eine Neigung von ca. 30° auf. Die Sonneneinstrahlung im Winter, die v.a. für die Moose von Bedeutung ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Tages- und Jahresverlaufes kaum von der des offenen Hanges. Unterschiede ergeben sich jedoch durch den Abschirmungseffekt der Bäume, die auch im unbelaubten Zustand Teile der Fläche beschatten. Gut läßt sich dies an der „Aprilkurve“ („Moos“) der Temperatur in Abb. 9 erkennen.

Im Sommer liegt die Meßstelle aufgrund des Kronendaches fast während des gesamten Tages im Schatten der Bäume. Bei einer Deckung der Baumschicht von ca. 85 % wandern nur einzelne Lichtflecken über den Hang. Den größten Lichtgenuß erhält die Fläche am Vormittag, wenn die Sonne dem Hang gegenüber steht und in stumpfem Winkel durch das Blätterdach scheint. Nachmittags liegt der Hang wegen des spitzen Einstrahlungswinkels und der hangaufwärts stehenden Bäume fast vollständig im Schatten.

Der Verlauf von Temperatur und Evaporationsrate (Abb. 9) zeigt erwartungsgemäß das ausgeglichene Waldklima während der Vegetationsperiode. Gestrichelt ist zudem der Temperaturverlauf im Moospolster vom 30. April wiedergegeben. Die Kurve zeigt nicht nur die größeren Temperaturschwankungen bei unbelaubtem Zustand, sondern auch deutlich die zeitweiligen Beschattungen durch die in der Nähe stehenden Bäume (v.a. 10:30 u. 12:30 Uhr).

## 4. Diskussion

Hemisphärische Photographien bieten die Möglichkeit, durch Überlagerung mit einem Sonnenstanddiagramm objektiv und reproduzierbar abzuschätzen, wann und wie lange eine bestimmte Untersuchungsfläche von der Sonne bestrahlt werden kann. Das Sonnenstanddiagramm ermöglicht es zum einen, die Position der Sonne für jeden beliebigen Zeitpunkt des Jahres abzulesen, zum anderen lassen sich bei stärker geneigten Flächen auch die Einstrahlungswinkel unmittelbar aus dem Diagramm entnehmen, zumindest für die Tageszeit, zu der die Sonne dem Hang genau gegenüber steht. Bereits diese, einem solchen Photo unmittelbar zu entnehmenden Informationen, bieten eine gute Grundlage zur Dokumentation und Analyse des Standortfaktors Strahlung und gehen i. d. R. über das hinaus, was bei vegetationsökologischen Untersuchungen bislang üblich ist.

Da die Strahlung auch einen unmittelbaren Einfluß auf die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse eines Standortes hat, geben hemisphärische Photographien auch hierüber einen ersten Einblick. Natürlich hängen diese auch von anderen Faktoren ab, wie z. B. der jährlichen Niederschlagsmenge und deren zeitlicher Verteilung, Sickerwasser, u. U. Spritzwasser usw.; auch mikroklimatische Besonderheiten wie lokale Kaltluftströme (s. o.) können eine Rolle spielen. Hemisphärische Photographien sollten daher nach Möglichkeit immer durch weitere Untersuchungen, insbesondere zum Temperatur- und Wasserhaushalt, ergänzt werden. Solche stichprobenartigen Untersuchungen zum Temperatur- und Wasserhaushalt, die für sich alleine betrachtet z. T. nur eine geringe Aussagekraft besitzen, helfen einzuschätzen, wie wichtig die Rolle des Strahlungsklimas für

die jeweiligen Standortverhältnisse ist und ob ausführlichere Messungen anderer Faktoren notwendig sind.

Sollen nicht die Wuchsorte einzelner ausgewählter Individuen (z. B. bei autökologischen Untersuchungen), sondern größere Flächen oder gar Pflanzengesellschaften hinsichtlich ihres Strahlungsklimas untersucht werden, ergibt sich das Problem, daß die Aussagen, die sich mit Hilfe eines solchen Photos treffen lassen, strenggenommen nur für die exakte Kameraposition bzw. für die Lage der Frontlinse des Objektivs gelten. Eine Aufnahme in 40 cm Höhe mag repräsentativ für die Krautschicht sein; besteht der Hang jedoch, wie auf Blockhalden die Regel, aus größeren Felsblöcken, so ist sie nicht unbedingt auch repräsentativ für die Moose und Flechten. Zur Untersuchung von Mikrohabitaten, z. B. verschieden exponierter und geneigter Seiten eines Felsblockes, sollte sich die Position der Frontlinse in eben diesen Bereichen befinden, was sicher nicht immer leicht zu verwirklichen ist.

Soll das Strahlungsklima einer größeren Fläche dokumentiert werden, müssen je nach Homogenität des Hangreliefs und der Umgebung (potentielle Beschattung der Fläche durch in der Umgebung befindliche Bäume oder Felsen) mehrere, für die jeweiligen Bereiche repräsentative Aufnahmen erstellt werden. Bei inselartig im Wald gelegenen offenen Blockhalden weichen insbesondere die Standortverhältnisse in den Randbereichen oft von denen der zentralen, offenen Fläche ab. Zum Teil lassen sich z. B. bei Kryptogamen ausgeprägte Zonierungen erkennen (vgl. z. B. WUNDER 1993, S. 55 ff), wobei hier neben einem abweichenden Strahlungsklima auch Regen- und Windschutz eine große Rolle spielen.

Problematischer als Untersuchungen auf offenen Blockhalden sind solche in Waldökosystemen, wenngleich hier der Anwendungsschwerpunkt hemisphärischer Photographien liegt (z. B. ANDERSON 1964, MADGWICK & BRUMFIELD 1969, RICH 1990). Aufgrund der unterschiedlich vielen Schichten durchstrahlter Blätter (vgl. Abb. 8) ist nicht nur eine sehr gut standardisierte und reproduzierbare Aufnahmemethode (insbesondere bzgl. der Belichtung) notwendig, sondern auch eine genaue Grauwertanalyse bei der Auswertung. Zudem muß die veränderte spektrale Zusammensetzung des Lichtes berücksichtigt werden. I. d. R. erfolgt die Analyse solcher Photographien heute durch computergestützte, digitale Bildauswertung (vgl. WAGNER 1994).

Während bei der Anwendung hemisphärischer Photographien zur Untersuchung von Waldökosystemen, insbesondere zur Grauwertkalibrierung der Photos, parallel auch Messungen der Beleuchtungsstärke (LUX) und der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) durchgeführt werden, fehlen solche Messungen bei der Analyse direkter Einstrahlungsenergien in überwiegend offenen Biotopen bislang weitgehend. Da nur für relativ wenige Orte Strahlungsdaten für horizontale, unbeschattete Flächen oder gar Bewölkungsmodelle vorliegen und diese z. T. weit voneinander entfernt sind, wären Vergleichsmessungen vor Ort zur Beurteilung der aus solchen Daten berechneten Einstrahlungsenergien wünschenswert.

Dennoch läßt auch eine nur oberflächliche Auswertung hemisphärischer Photographien zumindest von stärker geneigten und teilweise beschatteten Flächen, wie sie typisch für viele Blockhalden sind, sowie von Mikrohabitaten bereits brauchbare Rückschlüsse auf das Strahlungsklima zu. Bei vergleichenden Untersuchungen ergeben sich schon auf diesem Niveau interessante und z. T. überraschende Einblicke in die Strahlungsverhältnisse von Klein- und Kleinststandorten. Eine breitere Anwendung dieser relativ einfachen und daher besonders auch für vergleichende Untersuchungen geeigneten Methode könnte es dem Standortfaktor Strahlung ermöglichen, ein wenig aus seinem Schattendasein bei vegetationsökologischen Untersuchungen herauszutreten.

## 5. Zusammenfassung

Hemisphärische ("fisheye") Photographien lassen sich mit relativ geringem Aufwand anfertigen und ermöglichen mit Hilfe eines Sonnenstanddiagramms eine Abschätzung wann, wie lange und in etwa welchem Winkel eine Untersuchungsfläche von der Sonne bestrahlt werden kann. Sie erlauben eine objektive und relativ genaue Darstellung von Standortfaktoren, die sonst oft nur subjektiv und recht ungenau vor Ort eingeschätzt werden können oder mit großem Zeit- und Geräteaufwand erhoben werden müssen. Der Vergleich dreier hemisphärischer Photographien von Blockhalden des NSG Hundsbachtal/Eifel mit an denselben Stellen durchgeführten Temperatur- und Evaporationsmessungen, zeigt, daß deren Verlauf in vielen Fällen gut mit dem Strahlungsklima korreliert ist. Im Gegensatz zum Einsatz hemisphärischer Photos bei der Untersuchung von



Waldökosystemen, dem Hauptanwendungsgebiet dieser Technik, lassen sie bei stark geneigten und teilweise beschatteten Flächen, wie sie für viele Blockhalden typisch sind, auch bei einer oberflächlichen und schnellen Auswertung gute Rückschlüsse auf das Strahlungsklima zu. Das Verfahren ist daher besonders für vergleichende Untersuchungen gut geeignet. Unter Einbeziehung meteorologischer Daten lassen sich zudem Aussagen über Einstrahlungsenergien in  $W/m^2$  für beliebige Zeiträume berechnen.

#### Literatur

- ANDERSON, M. J. (1964): Studies of the woodland light climate, part I. The photographic computation of light conditions. - *Journal of Ecology* **52**, 27-41
- BECKER, P., ERHART, D. W. & SMITH, A. P. (1989): Analysis of forest light environments, part I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical canopy photographs. - *Agricultural and forest meteorology* **44**, 217-232
- CHAZDON, R. L., FIELD, C. B. (1987): Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. - *Oecologia* **73**, 525-532
- EVANS, G. C., COOMBE, D. E. (1959): Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. - *Journal of Ecology* **47**, 103-113
- GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4. Aufl. - Braunschweig
- KERSBERG, H. (1968): Die Prümer Kalkmulde (Eifel) und ihre Randgebiete. - Schriftenr. Landesstelle Natursch. Landschaftspf. NRW **4**, Recklinghausen, 223 S.
- MADGWICK H. A. I. & BRUMFIELD, G. L. (1969): The use of hemispherical photographs to assess light climate in the forest. - *Journal of Ecology* **57**, 537-542
- MONTEITH, J. L. (1973): Principles of environmental physics. - London
- OKER-BLOM, P. (1986): Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands. - *Acta Forestalia Fennica* **19**, 7
- PRINCE, S. D. (1987): Measurement of canopy interception of solar radiation by stands of trees in sparsely wooded savanna. - *Int. Journal of Remote Sensing* **8/12**, 1747-1766
- PROCTOR, M. C. F. (1980): Estimates from hemispherical photographs of radiation climates of some bryophyte habitats in the British Isles. - *Journal of Bryology* **11**, 351-366
- RICH, P. M. (1990): Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. - *Remote sensing reviews* **5** (1), 13-29
- ROSENKRANZ, F. (1951): Grundzüge der Phänologie. 1. Aufl. - Wien
- STEBING, L., FANGMEIER, A. (1992): Pflanzenökologisches Praktikum. - Stuttgart
- WAGNER, S. (1994): Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos. - Ber. d. Forschungszentrum Waldökosysteme, Reihe A, **123**, Göttingen
- WUNDER, J. (1993): Die Vegetation der Basaltblockhalden und angrenzender Standorte im NSG Hundsbachtal (Birresborn/Eifel). - Diplomarbeit, Universität Bonn, 140 S.
- WUNDER, J., MÖSELER, B. M. (1996): Kaltluftströme auf Basaltblockhalden und ihre Auswirkung auf Mikroklima und Vegetation. - *Flora* **191**, 335-344

Anschrift des Autors: Dipl. Biol. JÖRG WUNDER, Institut für Landwirtschaftliche Botanik, Abt. Geobotanik und Naturschutz, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Meckenheimer Allee 176, D-53115 Bonn, BR Deutschland

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Decheniana](#)

Jahr/Year: 1999

Band/Volume: [BH\\_37](#)

Autor(en)/Author(s): Wunder Jörg

Artikel/Article: [Abschätzung des Strahlungsklimas geneigter Flächen durch hemisphärische Photographien am Beispiel des NSG Hundsbachtal / Eifel 67-80](#)