

# Modellierung der kurzwelligen Einstrahlung mit GIS am Beispiel eines tropischen Hochgebirges

Thomas MÖLG

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

## Zusammenfassung

Die Studie präsentiert ein Modell zur Berechnung der Sonneneinstrahlung (kurzwellige Einstrahlung), das in der Programmiersprache AML (ArcMacro Language) des Geographischen Informationssystems Arc/Info formuliert wurde. Die Anwendung des Modells wird in drei Beispielen an einer Gebirgsgruppe des Ruwenzori, eines tropischen Hochgebirges in Äquatorial-Ostafrika, gezeigt: potenzielle Einstrahlung im Dezember (südliche Sonnenbahn), potenzielle Einstrahlung im Juni (nördliche Sonnenbahn) und Änderung der mittleren jährlichen Einstrahlung im Zuge einer Bewölkungsänderung. Schließlich kommen noch die notwendigen Voraussetzungen und Modifikationen im Modellprozess zur Diskussion, die die Übertragung und Anwendung des Strahlungsmodells auf ein beliebig gelegenes Untersuchungsgebiet ermöglichen.

## 1 Einführung

In der thermisch homogenen Atmosphäre der Tropen stellt die Reaktion von Gletschern auf das Klima eine äußerst sensible Interaktion dar (KASER 2001) und verdient daher besondere Beachtung in Fragen des „climatic change“ (OERLEMANS 1989). Vergletscherte tropische Gebirge finden sich gegenwärtig noch in Irian Jaya (Neu-Guinea), in Äquatorial-Ostafrika sowie in den südamerikanischen Anden. Alle tropischen Gletscher weisen die Gemeinsamkeit starker Rückgänge im 20. Jh. auf (KASER 1999). Neben vermindertem Niederschlag und angestiegener Temperatur scheint in einigen tropischen Gebirgen auch zugenommene Sonneneinstrahlung, in der Atmosphärenphysik als „kurzwellige Einstrahlung“ bezeichnet, eine entscheidende Rolle für die Gletscherrückgänge zu spielen. So weisen etwa die komplexen und räumlich ungleichen Rückgänge der Gletscher am Ruwenzori (Äquatorial-Ostafrika) im 20. Jh. auf eine Zunahme der kurzwelligen Einstrahlung infolge einer Bewölkungsänderung hin (KASER & NOGGLER 1996; KASER & OSMASTON 2001). Um die mögliche Bedeutung zugenommener kurzwelliger Einstrahlung für die Gletscherschwankungen am Ruwenzori zu evaluieren, wurde am Institut für Geographie der Universität Innsbruck eine Studie durchgeführt (MÖLG 2001; MÖLG, GEORGES & KASER 2002). Dafür erstellte man ein digitales Geländemodell des Untersuchungsgebiets und ein Strahlungsmodell, das in der Programmiersprache AML (*ArcMacro Language*) des Geographischen Informationssystems (GIS) Arc/Info formuliert wurde. Die vorliegende Arbeit (i) stellt diesen GIS-gestützten Modellierungsprozess mit Schwerpunkt auf dem Strahlungsmodell vor (Kapitel 2), (ii) zeigt Modellrechnungsergebnisse am Beispiel einer Gebirgsgruppe des

Untersuchungsgebiets (Kapitel 3) und (iii) diskutiert die am Strahlungsmodell notwendigen Modifikationen für eine Anwendbarkeit auf ein beliebig gelegenes Untersuchungsgebiet (Kapitel 4).

Die „kurzwellige Einstrahlung“ an der Erdoberfläche setzt sich aus zwei Komponenten zusammen (z.B. LILJEQUIST & CEHAK 1994): der direkten Sonneneinstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung. Letztere ist jene Strahlung, die erst nach Streuung an Luftmolekülen, Wassertröpfchen, Eiskristallen und/oder anderen Partikeln in der Atmosphäre (z.B. Staub) die Erdoberfläche erreicht. Die relative quantitative Bedeutung der kurzwelligen Einstrahlung im Energiehaushalt von Gletscheroberflächen ist etwa bei OHMURA (2001) gut dokumentiert. Der „Ruwenzori“, das in dieser Arbeit als Beispiel gezeigte Anwendungsgebiet, ist eine vergletscherte Gebirgskette in Äquatorial-Ostafrika. Seine Lage lässt sich nahezu exakt als Schnittpunkt des Äquators mit dem Meridian 30° Ost festlegen bzw. als Lage an der Grenze zwischen den beiden Staaten Zaire und Uganda ansprechen.

## 2 Der Modellierungsprozess

### 2.1 Das digitale Geländemodell

Die Erstellung digitaler Geländemodelle (DTM, *digital terrain model*) erfolgt in der Geographischen Informationsverarbeitung schon lange routinemäßig. Es sollen an dieser Stelle daher nur die wichtigsten Charakteristika des hier verwendeten DTMs genannt werden. Als Basisdaten dienten digitalisierte Isohypsen der Karte „Central Ruwenzori 1 : 25.000“ (zentrales Ruwenzori-Massiv) mit einer Äquidistanz von 100 ft (= 30,48 m). Aus diesen Höhenlinien wurden in ArcView GIS mit einem *Avenue*-Script die *Vertices* bestimmt, mit einem zweiten *Avenue*-Script diesen Punkten dann geographische Koordinaten, entsprechend der Georeferenzierung der Basisdaten, zugewiesen. Schließlich erfolgte das Einlesen der Koordinatentripel (geographische Länge, geographische Breite und Höhe über NN) in das Programm Surfer 7, das ausschließlich für die Berechnung von Oberflächen entwickelt wurde (GOLDEN SOFTWARE 1999). Die Interpolation des DTMs wurde mit dem Algorithmus *Kriging* durchgeführt. *Kriging* ist ein geostatistisches Schätzverfahren, das für die Errechnung der Schätzwerte auf die Bildung von gewichteten Mittelwerten der betroffenen Variablenwerte zurückgreift (SCHAFMEISTER 1999). Das für die Kriging-Interpolation erstellte Variogramm des Untersuchungsgebiets wurde durch ein lineares Variogrammmodell nach KITANIDIS (1997) angenähert. Die Abspeicherung des DTMs erfolgte schließlich als Rastermodell (*Grid*) mit einer Zellgröße von 25 m in einer ASCII-Datei, um es in die GIS-Software von ESRI (Environmental Systems Research Institute), Arc/Info oder ArcView GIS, importieren zu können.

### 2.2 Das Strahlungsmodell

Das physikalisch-mathematische Fundament des Strahlungsmodells wird von der Parametrisierung zur Berechnung der direkten kurzwelligen Sonneneinstrahlung bei wolkenlosem Himmel auf eine ebene Fläche  $SW \downarrow(dir)$  gebildet, die sich aus (z.B. HASTENRATH 1984)

$$SW \downarrow(dir) = S_0 E_0 \cos \zeta \left[ \frac{0,907}{(\sin h)^{0,018}} \right]^{\frac{T}{\sin h}} \quad (1)$$

bestimmen lässt.  $S_0$  ist die *Solarkonstante* (kurzwellige Bestrahlungsstärke der Sonne auf eine senkrecht zur Strahlungsrichtung stehende Fläche an der fiktiven Obergrenze der Atmosphäre), für die der Wert  $1.370 \text{ Wm}^{-2}$  verwendet wurde (LILJEQUIST & CEHAK 1994).  $E_0$  symbolisiert den *Exzentrizitätskorrekturfaktor*, der den im Jahresverlauf variierenden Abstand zwischen Sonne und Erde berücksichtigt, und  $\zeta$  den Zenitdistanzwinkel der Sonne auf eine beliebig geneigte und exponierte Ebene. Neigung (*slope*) und Exposition (*aspect*) lassen sich für jede Zelle des digitalen Geländemodells (Kapitel 2.1) bestimmen. Die Größe  $h$  benennt die Sonnenhöhe über der Horizontebene für die jeweilige Tages- und Jahreszeit,  $T$  den sog. *Trübungsfaktor nach Linke*, der ein Maß für die Schwächung der Strahlung durch Wasserdampf und Dunst darstellt. Die Berechnung und die genaue Erklärung aus meteorolo- bzw. klimatologischer Sicht von  $E_0$ ,  $\zeta$ ,  $h$  und  $T$  finden sich z.B. bei IQBAL (1983). Wie schon in Kapitel 1 gesagt wurde, trägt auch die diffuse Himmelsstrahlung zur kurzwelligigen Einstrahlung an der Erdoberfläche bei. Bei klarem Himmel resultiert diese diffuse Komponente v.a. aus der Streuung an Luftmolekülen, ist in tropischen Hochgebirgen in Relation zur direkten Sonneneinstrahlung jedoch sehr klein. Messungen am Mount Kenia zeigen, dass der diffuse Anteil der kurzwelligigen Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel im Mittel lediglich ca. 5 % des Wertes der direkten Sonneneinstrahlung ausmacht (HASTENRATH 1984). Da der Mount Kenia aufgrund seiner Lage über die fast idente Strahlungsgeometrie wie der Ruwenzori verfügt, ergibt sich für die kurzwellige Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel  $SW\downarrow_0$ ,

$$SW\downarrow_0 = SW\downarrow(\text{dir}) + SW\downarrow(\text{diff, clear}) = 1,05 SW\downarrow(\text{dir}) \quad (2)$$

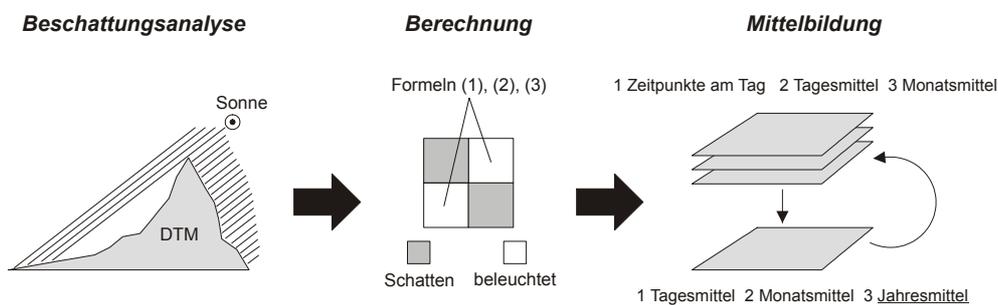
wobei  $SW\downarrow(\text{dir})$  für die aus Formel (1) errechnete direkte Sonneneinstrahlung steht,  $SW\downarrow(\text{diff, clear})$  für die diffuse Himmelsstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Die kurzwellige Einstrahlung bei bewölktem Himmel  $SW\downarrow_C$  errechnet sich aus der folgenden Parametrisierung (HASTENRATH 1984):

$$SW\downarrow_C = SW\downarrow_0 (1 - k C) \quad (3)$$

$SW\downarrow_0$  benennt die bereits bekannte Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel,  $k$  ist ein empirischer Koeffizient (0,65 am Äquator) und  $C$  die Bewölkung in Zehntel.

Zur Formulierung des Strahlungsmodells diente die Makrosprache AML (*ArcMacro Language*), welche in Arc/Info zur Verfügung steht. Abbildung 1 zeigt die Grundstruktur der Programmierungen. Im ersten Schritt wird für die jeweilige Tages- und Jahreszeit eine Beschattungsanalyse am digitalen Geländemodell durchgeführt (Abbildung 1, links), anschließend nur für die beschienenen Zellen die Formeln (1) bis (3) angewandt, wobei (3) natürlich entfällt, wenn für wolkenlosen Himmel gerechnet wird (Abbildung 1, Mitte). Als zweite Bedingung für die Anwendung der Formeln auf eine Zelle wurde noch festgelegt, dass der Ausdruck  $\cos \zeta$ , der Cosinus des Zenitdistanzwinkels der Sonne auf die beliebig geneigte und exponierte Ebene (Zelle), größer als null sein muss. Ist dieser Ausdruck nämlich null oder kleiner als null, bedeutet dies, dass die Sonne für die jeweilige Zelle „in oder unter der Oberfläche“ steht. Zellen, für die jenes zutrifft, müssen bei korrekter Funktionsweise des Modellprozesses (DTM  $\leftrightarrow$  Strahlungsmodell) daher bereits in der Beschattungsanalyse als beschatteter Bereich ausgewiesen sein. Die beiden Bedingungen („Zelle beleuchtet“ und „ $\cos \zeta > 0$ “) ergänzen sich somit und sichern sich gegenseitig ab. Für das zentrale Ruwenzori-Massiv erfolgten die Berechnungen für jeden Tag zwischen 6 Uhr und 18 Uhr wahre Sonnenzeit (WSZ) jeweils 15 und 45 Minuten nach der vollen

Stunde, was eine zeitliche Auflösung von 30 Minuten bedeutet. Diese ganzjährig idente Periode pro Tag, in der die Strahlung modelliert wird, ist für den Ruwenzori zulässig, da die Tages- und Nachtlänge am Äquator im Laufe eines Jahres nur um wenige Dekaminuten vom 12-Stunden-Wert abweichen. Aus den 24 Zeitpunkten pro Tag, für die die kurzweilige Einstrahlung berechnet wurde, ergibt sich nach arithmetischer Mittelung und Division durch zwei schließlich das Tagesmittel der Einstrahlung. Aus den Tagesmitteln können folglich die Monatsmittel bestimmt werden, z.B. ergibt das Mittel der Tage 1 bis 31 im Jahr das Jänner-Mittel, jenes der Tage 32 bis 59 im Jahr das Februar-Mittel, usw. Das Jahresmittel der kurzweiligen Einstrahlung erhält man schließlich aus den zwölf Monatsmitteln (Abbildung 1, rechts). Nicht mehr benötigte Daten werden in den Programmierungen während des Rechendurchlaufs gelöscht, z.B. die Beschattungsmasken für die jeweilige Tages- und Jahreszeit nach Berechnung der Strahlung oder auch die Ergebnisse für die einzelnen Zeitpunkte am Tag nach Bildung des Tagesmittels. Für einen Jahresdurchlauf benötigte das Modell auf einem Pentium-II-Prozessor etwa 8 Stunden.

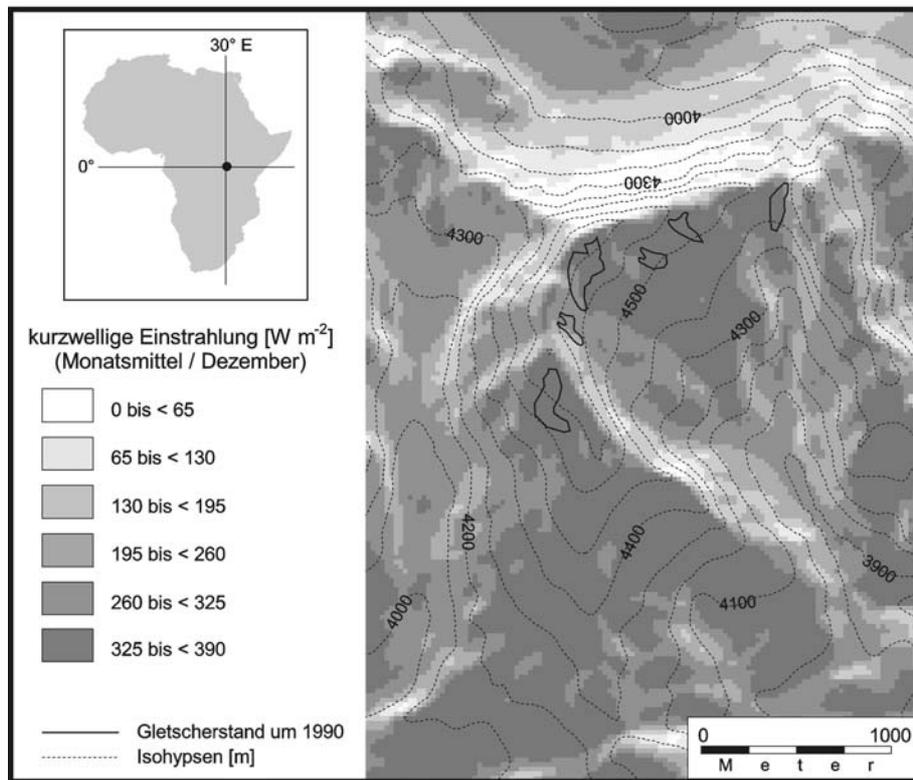


**Abb. 1:** Schema der Grundstruktur der Strahlungsmodell-Programmierung (eigener Entwurf)

### 3 Anwendung des Strahlungsmodells am Ruwenzori

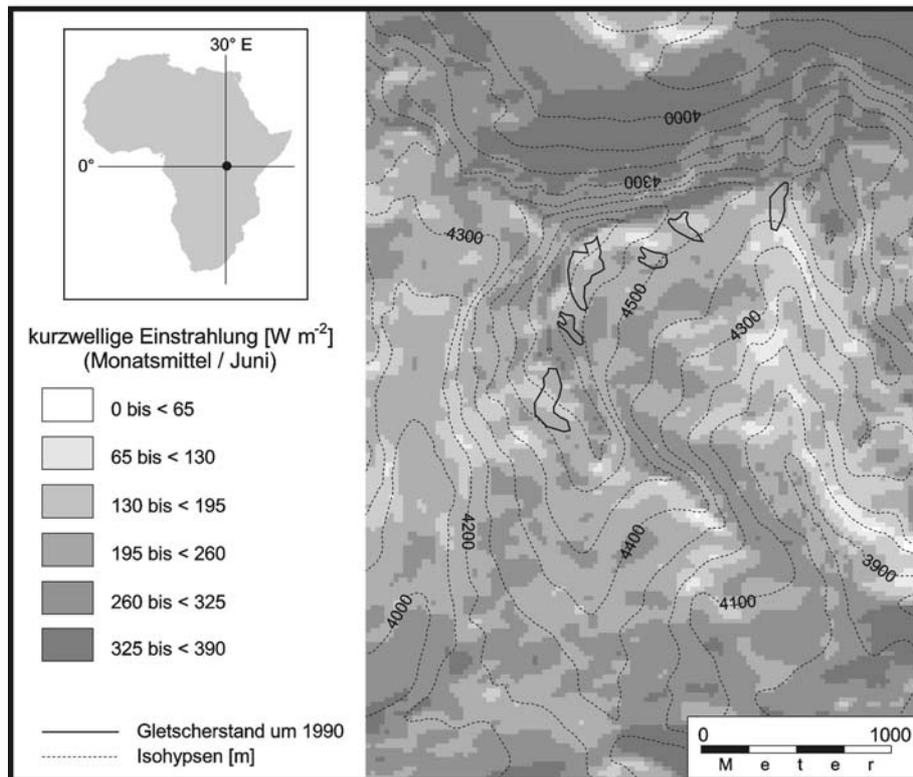
Dieses Kapitel zeigt die Anwendung des in Kapitel 2.2 vorgestellten Strahlungsmodells am Mount Baker, einem der drei Gebirgsgruppen im zentralen Ruwenzori-Massiv. Die beiden ersten Berechnungen (Abbildung 2, Abbildung 3) sind in Bezug auf das tropenspezifische Phänomen der im Jahresverlauf wechselnden scheinbaren Sonnenbahn gewählt. Da die Sonne in tropischen Breiten (zwischen den beiden Wendekreisen  $23,5^\circ$  N und  $23,5^\circ$  S) zweimal im Jahr im Zenit steht, verläuft die scheinbare Sonnenbahn eine bestimmte Zeit des Jahres nördlich, die restliche Zeit südlich des Beobachtungspunktes. Am Ruwenzori steht die Sonne zwischen 23. September und 21. März südlich, zwischen 22. März und 22. September nördlich des Gebirges (vgl. Tageswerte der Deklination bei IQBAL 1983, S. 8-9). Abbildung 2 präsentiert das Monatsmittel der kurzweiligen Einstrahlung im Dezember (Sonne im Süden) für hypothetisch wolkenlosen Himmel. In diesem Monat weisen 84 % der Flächen im zentralen Ruwenzori-Massiv, welche im Monatsmittel die größte kurzweilige Einstrahlung erhalten ( $325$  bis  $< 390 \text{ W m}^{-2}$ ), eine Exposition zwischen  $125^\circ$  und  $245^\circ$  auf, ihre mittlere Neigung beträgt  $28^\circ$ . Die Flächen mit der geringsten kurzweiligen Einstrahlung ( $0$  bis  $< 65 \text{ W m}^{-2}$ ) haben zu 98 % eine Ausrichtung zwischen  $320^\circ$  und  $40^\circ$  sowie eine mittlere Neigung von  $57^\circ$  (MÖLG 2001). Diese Charakteristika zeigen sich auch

am Mount Baker deutlich. Südhänge sind im Dezember einstrahlungsbegünstigt, während v.a. die nördlich orientierte Steilwand im Norden des Berges kaum von der Einstrahlung partizipieren kann, teils sogar den gesamten Monat im Schatten liegt und folglich Zellen mit dem Monatsmittelwert „0“ vorliegen.



**Abb. 2:** Mittlere kurzwellige Einstrahlung am Mount Baker im Dezember

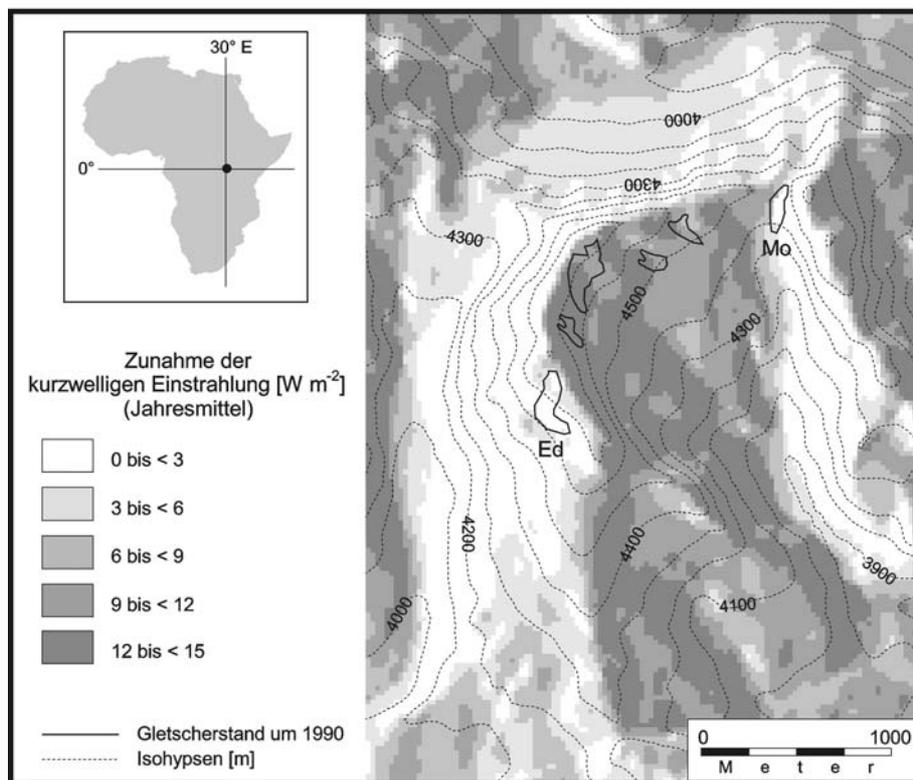
Die Einstrahlungsverhältnisse bei hypothetisch wolkenlosem Himmel für Juni, der repräsentativ für Monate mit nördlicher Sonnenbahn ist, findet man in Abbildung 3. Im zentralen Ruwenzori-Massiv liegen die Flächen mit der größten mittleren Einstrahlung (325 bis < 390 W m<sup>-2</sup>) nun alle im nördlichen Halbraum (77 % davon zwischen 320° und 40°) und besitzen eine mittlere Neigung von 31°. Die geringsten Werte (0 bis < 65 W m<sup>-2</sup>) finden sich auf Flächen mit Expositionen zwischen 147° und 216° und einer mittleren Neigung von 56° (MÖLG 2001). Auch am Mount Baker liegen die Südhänge in Bereichen relativ mäßiger Einstrahlung, und nun erhalten die nordorientierten Bereiche des Berges reichlich kurzwellige Strahlung. Die Steilwand im Norden, die auch in den nördlichen Halbraum exponiert ist, kann die angebotene Energie nicht so gut umsetzen wie etwa der nördlich daran anschließende flachere Bereich. Die Erklärung dafür liegt im Einstrahlungsklima der Tropen. Die ganzjährig hohen Sonnenstände sind für flache Bereiche viel effektiver, da diese einen geringeren Zenitdistanzwinkel zur Sonne haben (siehe Formel (1), Kapitel 2.2).



**Abb. 3:** Mittlere kurzwellige Einstrahlung am Mount Baker im Juni

Die dritte Berechnung berücksichtigt nun noch die Bewölkung, die – bedingt durch die lokale Zirkulation – in tropischen Hochgebirgen einen typischen Tagesgang hat, der erstmals von TROLL & WIEN (1949) beschrieben wurde. In der Nacht und auch noch am frühen Morgen herrschen in der Atmosphäre über dem Gebirge absinkende Luftmassen vor. Dies führt zu Aufklärung der Gipfelregionen und zu dichter Bewölkung in den Tälern, da dort die hangabwärtigen Winde zusammentreffen und ein Konfluenzbereich entsteht. Mit zunehmender Besonnung kehrt sich die topographisch induzierte Zirkulation noch in den Morgenstunden um, und hangaufwärts gerichtete Winde stellen sich ein. Dadurch bildet sich bereits am Morgen sog. *konvektive Bewölkung*, die die Gipfelbereiche einhüllt. Das Maximum der Bewölkung und des Niederschlags wird dann am Nachmittag erreicht. In den Abendstunden beginnen wieder hangabwärts gerichtete Winde zu dominieren, und der Kreislauf beginnt erneut. Abbildung 4 zeigt, wie sich die kurzwellige Einstrahlung im Jahresmittel ändern würde, wenn sich das Einsetzen der Bewölkung im oben beschriebenen Mechanismus halbstündig verzögern würde: um 9 Uhr statt 8.30 Uhr in den trockeneren Jahreszeiten (Jänner/Februar und Juni/Juli) und um 8.30 Uhr statt 8 Uhr in den feuchten Jahreszeiten (März bis Mai und August bis Dezember). Methodisch erhält man diese Differenz, indem man zwei Szenarien mit zeitlich verschieden einsetzender Bewölkung rechnet und anschließend das Szenario mit früher einsetzender vom Szenario mit später einsetzender Bewölkung subtrahiert. Den Berechnungen mit Bewölkung liegen die

Prämissen zugrunde, dass sich die konvektive Bewölkung innerhalb einer halben Stunde von einem Bedeckungsgrad von 0/10 zu 10/10 entwickelt, das Untersuchungsgebiet komplett einhüllt und bis zum Sonnenuntergang bestehen bleibt. Die Bewölkungsbeobachtungen am Ruwenzori von WHITTOW et al. (1963) sichern diese Annahmen gut ab. Bereiche mit großer Zunahme der kurzwelligen Einstrahlung (12 bis  $< 15 \text{ W m}^{-2}$ ) bei der genannten Bewölkungsänderung weisen im zentralen Ruwenzori-Massiv Expositionen zwischen  $41^\circ$  und  $139^\circ$  auf, die Analyse ihrer mittleren Neigung ergibt  $36^\circ$ . Die Flächen mit keiner bzw. äußerst kleiner Einstrahlungsdifferenz (0 bis  $< 3 \text{ W m}^{-2}$ ) liegen im Expositionsbereich zwischen  $200^\circ$  und  $360^\circ$  und weisen eine durchschnittliche Neigung von  $39^\circ$  auf (MÖLG 2001). Auch für den Mount Baker in Abbildung 4 ist klar ersichtlich, dass sich die Einstrahlung an den zwischen Nordost und Südost orientierten Hängen am meisten verstärkt, wenn sich die Änderung im Einsetzen der Bewölkung in den frühen Morgenstunden vollzieht. Aus klimatologischer und glaziologischer Sicht bietet diese Berechnung die Erkenntnis, dass sich die letzten Reste des Moore-Gletschers (Mo) und des Edward-Gletschers (Ed) bis um 1990 in Bereiche zurückgezogen haben, die für eine Bewölkungsänderung in den Morgenstunden relativ unsensibel sind.



**Abb. 4:** Änderung der mittleren jährlichen kurzwelligen Einstrahlung infolge einer Bewölkungsänderung (siehe Text) am Mount Baker

Die in diesem Kapitel vorgestellten Beispiel-Resultate basieren – gemäß den Ausführungen zum Strahlungsmodell in Kapitel 2.2 – auf beliebig geneigten und exponierten Referenzflächen. Will man modellierte Werte im Zuge wissenschaftlicher Studien in eine Energiebilanz- oder Massenbilanz-Rechnung einsetzen, sind jedoch unbedingt horizontale Referenzflächen für die Berechnung zu verwenden, da alle Terme in Energie- und Massenbilanzen vertikal gemessen werden (z.B. HOINKES 1970). Dies hat sowohl messtechnische Gründe als auch jenen, dass ausschließlich die horizontal projizierte Fläche eindeutig definierbar ist.

#### **4 Modifikationen zur Anwendung des Strahlungsmodells auf ein Untersuchungsgebiet in beliebiger Lage**

Das in Kapitel 2 präsentierte und in Kapitel 3 angewandte Strahlungsmodell wurde für den Ruwenzori entwickelt und daher in bestimmten Parametern an seine Lage in den inneren immerfeuchten Tropen angepasst. Nach einigen Modifikationen kann das Modell jedoch auf ein beliebig gelegenes Untersuchungsgebiet übertragen werden. Voraussetzung ist, dass das digitale Geländemodell des Untersuchungsgebiets im Rasterformat (*Grid*) vorliegt und die mittlere geographische Breite dieses Gebiets bestimmt werden kann. Folgende Anpassungen an ein räumliches Individuum sind notwendig:

- Das Tagesintervall, in dem die Strahlung modelliert wird, muss definiert werden. Für das Beispiel „Ruwenzori“ reichte es aus, dieses Intervall ganzjährig zwischen 6 Uhr und 18 Uhr WSZ festzulegen, da die Tageslänge am Äquator vernachlässigbar gering schwankt. Mit zunehmender Entfernung vom Äquator und Annäherung an die Pole nehmen die Unterschiede zwischen Tages- und Nachtlänge im Jahresverlauf jedoch markant zu. Für außertropische Untersuchungsgebiete sollte daher zumindest für jeden Monat die mittlere Tagesperiode, in der die Sonne über dem lokalen Horizont steht, bestimmt werden. Die Zeitpunkte von Sonnenaufgang und -untergang kann man mittels einer simplen Formulierung und den Tageswerten der Deklination (z.B. IQBAL 1983, S. 8-9, S. 15) für jeden Tag berechnen. Andererseits kann für die Außertropen die Programmierung des Wechsels zwischen nördlicher und südlicher scheinbarer Sonnenbahn im Jahresverlauf entfallen, da diese außerhalb der beiden Wendekreise ganzjährig im Süden (Nordhemisphäre) bzw. im Norden (Südhemisphäre) verläuft.
- Die zeitliche Auflösung innerhalb des Tagesintervalls, für das die Strahlung modelliert wird, kann wie in dieser Arbeit halbstündig gewählt bzw. in Anpassung an die jeweilige Fragestellung für bestimmte Perioden des Tages verfeinert oder vergrößert werden.
- Der Trübungsfaktor  $T$  der Atmosphäre, der die Abschwächung der Einstrahlung durch Wasserdampf und Dunst/Staub in Formel (1) (Kapitel 2.2) berücksichtigt, muss für das lokale Untersuchungsgebiet berechnet werden. Im einfachsten Fall – wenn man die Trübung durch Staub konstant setzt – genügt dafür die Kenntnis des Wasserdampfpartialdrucks (BERNHARDT & PHILIPPS 1958), der ein Maß für die absolute Feuchtigkeit der Luft ist. Stehen auch Luftdruckmessungen zur Verfügung, kann noch die sog. *optische Luftmasse* in den Trübungsfaktor eingerechnet werden (LILJEQUIST & CEHAK 1994). Die Einstrahlung am Ruwenzori wurde mit  $T = 1,9$  gerechnet.
- Das Verhältnis der diffusen Himmelsstrahlung zur direkten Sonneneinstrahlung bei wolkenlosem Himmel (siehe Formel (2), Kapitel 2.2) muss aus Messungen im Untersu-

chungsgebiet bzw. aus Messungen in Gebieten, die im selben Einstrahlungsklima wie das Untersuchungsgebiet liegen, abgeleitet werden, was auch für das Beispiel in dieser Arbeit geschah.

- Um Berechnungen für bewölkte Verhältnisse durchzuführen, hat man nach Formel (3) (Kapitel 2.2) einen breitenspezifischen Wert für die Konstante  $C$  zu verwenden. Diesen findet man z.B. bei BUDYKO (1974). Für die mittleren Breiten ( $45^\circ$ ) wird dort  $C = 0,66$  angegeben, für die hohen Breiten ( $75^\circ$ )  $C = 0,45$ .

Die oben genannten Ausführungen implizieren, dass das Vorliegen von atmosphärischen Daten für das Untersuchungsgebiet, also meteorologischen Messungen und Beobachtungen, viele Annahmen im Modellprozess ersetzen und so zu einer besseren Annäherung an die Wirklichkeit beitragen kann. Im Idealfall wären dies Messungen des Luftdrucks, des Dampfdrucks, der Strahlung und damit in Zusammenhang stehend der Trübung sowie Beobachtungen der Bewölkung im Tages- und Jahresgang.

## 5 Schlussbemerkung und Ausblick

Die vorliegende Studie stellte ein Modell zur Berechnung der kurzwelligen Einstrahlung vor, das in der Programmiersprache AML (*ArcMacro Language*) des Geographischen Informationssystems Arc/Info formuliert wurde. Durch die Modifikation bestimmter Parameter im Modellierungsprozess kann dieses an den Ruwenzori angepasste Modell auf beliebig gelegene Untersuchungsgebiete übertragen werden. Limitationen liegen dort vor, wo keine atmosphärischen Daten gesammelt werden bzw. existieren. Für sehr große Untersuchungsgebiete, die die Annahme relativ homogener meteorologischer Verhältnisse und daher konstanter Parameter pro Berechnungszeitpunkt (z.B. Bewölkungsgrad) nicht mehr erlauben, müsste der hier gezeigte Modellansatz um Gradienten der betroffenen Parameter, etwa in Form von Trendflächen, erweitert werden.

Neben dem Einsatz in der Wissenschaft (z.B. HOCK 1999; MÖLG 2001; MÖLG, GEORGES & KASER 2002) haben Strahlungsmodelle auch einen hohen praktischen Wert. So wurde etwa im Sommer 2001 auf einem GIS-List-Server seitens des Instituto da Conservação da Natureza (Montesinho, Portugal) der Wunsch nach einem Modell geäußert, das die Sonneneinstrahlung berechnet, um damit das Brandrisiko im Nationalpark Montesinho abschätzen zu können. Für Zwecke der Wasserwirtschaft wiederum hat die Modellierung der Schneeschmelze in einem Einzugsgebiet einen hohen Stellenwert, und in diesem Modellierungsprozess ist die Integration eines Strahlungsmodells ebenso sehr wertvoll (BERNHARD & WEIBEL 1999). Schließlich sind Strahlungsmodelle auch die Basis für alle Fragen der Nutzung von Sonnenenergie (GOETZBERGER & WITTEW 1989). All diese Beispiele verdeutlichen, dass Modelle zur Berechnung der Einstrahlung eine vielseitige Anwendungschance besitzen.

## 6 Literatur

- BERNHARD, L. & R. WEIBEL (1999): *Modelling snowmelt using a digital terrain model and GIS based techniques*. – In: Dikau, R. & H. Saurer (Hg.): GIS for earth surface systems. Borntraeger: Berlin, Stuttgart, S. 25-46.

- BERNHARDT, F. & H. PHILIPPS (1958): *Die räumliche und zeitliche Verteilung der Einstrahlung, der Ausstrahlung und der Strahlungsbilanz im Meeresniveau. Teil 1: Die Einstrahlung.* (= Abhandlungen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR 45) – Meteorologischer Dienst der DDR: Berlin.
- BUDYKO, M.I. (1974): *Climate and life.* – Academic Press: New York, London.
- GOETZBERGER, A. & V. WITTEW (1989): *Sonnenenergie – thermische Nutzung.* (= Teubner Studienbücher Physik) – Teubner: Stuttgart, 2. Aufl.
- GOLDEN SOFTWARE (Hg.) (1999): *Surfer 7 user's guide. Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers.* – Golden Software, Inc.: Golden.
- HASTENRATH, S. (1984): *The glaciers of Equatorial East Africa.* – Reidel: Dordrecht, Boston, Lancaster.
- HOCK, R. (1999): *A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation.* – In: Journal of Glaciology, Vol. 45, H. 149, S. 101-111.
- HOINKES, H. (1970): *Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953-1968.* – In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Vol. 6, S. 37-90.
- IQBAL, M. (1983): *An introduction to solar radiation.* – Academic Press: Toronto, New York, London.
- KASER, G. & B. NOGGLER (1996): *Glacier fluctuations in the Ruwenzori Range (East Africa) during the 20<sup>th</sup> century – a preliminary report.* – In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Vol. 32, S. 109-117.
- KASER, G. (1999): *A review of the modern fluctuations of tropical glaciers.* – In: Global and Planetary Change, Vol. 22, S. 93-103.
- KASER, G. (2001): *Glacier-climate interactions at low latitudes.* – In: Journal of Glaciology, Vol. 47, H. 15, S. 195-204.
- KASER, G. & H. OSMASTON (2001): *The nature of tropical glaciers.* (= International Hydrological Series) – Cambridge University Press: Cambridge.
- KITANIDIS, P. (1997): *Introduction to geostatistics - applications in hydrogeology.* – Cambridge University Press: Cambridge, New York.
- LILJEQUIST, H. & K. CEHAK (1994): *Allgemeine Meteorologie.* – Vieweg: Braunschweig, 3. Aufl.
- MÖLG, T. (2001): *Modellierung der Globalstrahlung in Zusammenhang mit neuzeitlichen Gletscherschwankungen am Ruwenzori.* – Diplomarbeit, Institut für Geographie der Universität Innsbruck: Innsbruck.
- MÖLG, T., GEORGES, C. & G. KASER (2002): *The contribution of increased incoming short-wave radiation to the retreat of the Ruwenzori glaciers (East Africa) during the 20<sup>th</sup> century.* – eingereicht bei: International Journal of Climatology, Feb. 2002.
- OERLEMANS, J. (Hg.) (1989): *Glacier fluctuations and climatic change.* – Kluwer: Dordrecht.
- OHMURA, A. (2001): *Physical basis for the temperature-based melt-index method.* – In: Journal of Applied Meteorology, Vol. 40, H. 4, S. 753-760.
- SCHAFMEISTER, M.T. (1999): *Geostatistik für die hydrogeologische Praxis.* – Springer: Berlin, Heidelberg, New York.
- TROLL, C. & K. WIEN (1949): *Der Lewis Gletscher am Mount Kenia.* – In: Geografiska Annaler, Vol. 31, S. 257-274.
- WHITTOW, J.B. et al. (1963): *Observations on the glaciers of the Ruwenzori.* – In: Journal of Glaciology, Vol. 4, H. 35, S. 581-616.