

## EIN KONZEPT ZUR REGIONALISIERUNG DES KLIMAS KOMPLEXER MITTELGEBIRGSLANDSCHAFTEN veranschaulicht am Beispiel des Osterzgebirges

Mit 6 Abbildungen (Abbildungen 1 und 4–6 als Beilage IX)

VALERI GOLDBERG und CHRISTIAN BERNHOFER

*Summary:* A concept of climate regionalization in complex mountain ranges illustrated for the Eastern Ore Mountains

This study presents a concept of regionalization, that aims at a physically based and spatially detailed description of the regional climate. Its application is demonstrated for the Eastern Ore Mountains. The regional and local climate was characterized by empirical relationships between the climatological quantity (e.g., temperature and precipitation) and height above sea level. The small-scale effects of geometry (slope and aspect) and surface characteristics on climate are quantified by model approaches to parameterize radiation, temperature and precipitation in complex terrain. The theoretically generated results are mainly presented in nomograms and they are suitable for direct practical use (e.g., radiation for solar energy applications).

These regionalization algorithms are transferred into a digital elevation model. This yields highly resolved areal information of important climatological standard values and extreme values of radiation, temperature and precipitation depending on topography and landuse.

Especially the spatial distribution of extreme values cannot be derived from routine data. But it is of great interest for potential users of climatic data (e.g., in forestry). Exemplary results in a test area in the upper region of the Eastern Ore Mountains show that the modelled daytime temperature maximum on March 21 differs in a wide range of 43 K and the hydrological summer precipitation varies between upwind and downwind slopes in a range of 31 %.

This concept of regionalization can be transferred to other mountain areas if the topography and the landuse are known and the large-scale climatic conditions are similar to the investigated area. The combination of empirical and modelled data leads relatively fast to new climate information and valuable results for various applications in environmental planning.

*Zusammenfassung:* In der vorliegenden Studie wird ein Regionalisierungskonzept vorgestellt, das eine physikalisch fundierte und räumlich detaillierte Beschreibung des Regionalklimas zum Ziel hat. Die Anwendung des Konzeptes wird für die Region des Osterzgebirges gezeigt. Das Regional- und Lokalklima wird durch empirische Regressionsbeziehungen der Klimagröße (z.B. Temperatur und Niederschlag) zur Seehöhe beschrieben, der kleinräumige Effekt von Geländegeometrie (Neigung und Azimut) und Landnutzung auf das Klima durch Modellansätze zur Parametrisierung von Strahlung, Temperatur und Niederschlag im komplexen Gelände quantifiziert. Diese theoretisch abgeleiteten Ergebnisse werden hauptsächlich in Nomogrammen dargestellt und sind z.T. direkt praktisch nutzbar (z.B. für die Anwendung in der Solarenergietechnik).

Mit der Übertragung der Regionalisierungsansätze in ein digitales Höhenmodell werden hochaufgelöste Flächeninformationen wichtiger klimatologischer Standardwerte und von Extremwerten zu Strahlung, Temperatur und Niederschlag in Abhängigkeit von Topographie und Landnutzung bereitgestellt.

Insbesondere die räumliche Verteilung von Extremwerten kann i.a. nicht aus Routinedaten abgeleitet werden. Sie ist jedoch für die potentiellen Nutzer von Klimadaten (z.B. in der Forstwirtschaft) von großem Interesse. Exemplarische Ergebnisse in einem Testgebiet in den Hochlagen des Osterzgebirges zeigen für den 21. März eine Variation des Temperaturmaximums von 43 K sowie eine Schwankung des modellierten Niederschlages im Sommerhalbjahr zwischen luv- und leeseitigen Hanglagen um 31%.

Dieses Regionalisierungskonzept kann auf andere Mittelgebirgsregionen übertragen werden, wenn Topographie und Landnutzung bekannt sind und ähnliche großräumige Klimaverhältnisse vorherrschen. Die Kombination von empirischen und modellierten Daten führt relativ schnell zu neuen Klimainformationen und Ergebnissen, die für verschiedene Anwendungen in der Naturraumplanung nutzbar sind.

### *Einstieg*

Landschaftsplanung in topographisch gegliederten Mittelgebirgsregionen erfordert eine genaue Kenntnis der vom Relief und der Landnutzung abhängigen

Kleinklimate. Die Erfassung dieser Kleinklimate ist jedoch meistens nicht auf Basis von Messungen allein möglich. Das liegt vor allem daran, dass Messungen aus materiellen und logistischen Gründen nur in begrenztem Zeitumfang und im Allgemeinen nur an standar-

disierten Messflächen durchgeführt werden. Das in dieser Studie vorgestellte Konzept trägt mit einer Kombination aus messwert- und modellgestützten Ansätzen zur Klimaregionalisierung diesem Hintergrund Rechnung.

## 1 Einleitung und Zielstellung

Im Rahmen eines interdisziplinären BMBF-Forschungsprojektes („Waldumbau Erzgebirge“) wurden mit der Zielstellung, wissenschaftliche Grundlagen für einen modernen Waldumbau in den stark immissionsgeschädigten Hoch- und Kammlagen des Erzgebirges zu erarbeiten, standörtliche Besonderheiten und Lokalgradienten des Klimas im Osterzgebirge erfasst (GOLDBERG et al. 1998). Dabei wurde die Diskrepanz zwischen dem fachübergreifenden Bedarf an regionalen Klimainformationen und dem Stand aktueller Forschung zum Regionalklima und zur Klimaregionalisierung in der Region Osterzgebirge aufgezeigt (FLEMING 1993; GOLDBERG 1997; GOLDBERG u. BERNHOFER 1998 a, 1998 b). So datieren z.B. die derzeit verwendeten Klimakarten einige Jahrzehnte zurück (MD DDR und HMU CSSR 1973), während gleichzeitig nur zwei aktuelle DWD-Klimastationen (Zinnwald-Georgenfeld und Dippoldiswalde) mit relativ kurzen Zeitreihen (28 Jahre bzw. 10 Jahre) im Osterzgebirge existieren.

Unter dem Begriff „Regionalisierung“ wird in Anlehnung an STEINHARDT (1998) die Übertragung von Daten aus einem Ausgangs- in ein Zielgebiet verstanden, wobei sich die Zieldaten in mindestens einem der Attribute „Bezugsobjekt“, „Merkmal“ und „Skala“ von den Ausgangsdaten unterscheiden. Eine Übersicht zum aktuellen Stand der Forschung zur Regionalisierung in der Landschaftsökologie geben STEINHARDT und VOLK (1999).

In der Literatur werden oft Ansätze und Verfahren zur Klimaregionalisierung behandelt, die von räumlich verdichteten empirischen Daten ausgehen bzw. einzelne Klimakomponenten über einfache analytische Ansätze und sogenannte „Look-up-tables“ behandeln (z. B. die direkte kurzweilige Strahlung bei LESER u. KLINK 1988). Wir stellen hier ein Regionalisierungskonzept vor, das mit einer Kombination aus messwert- und modellgestützten Ansätzen zur Regionalisierung differenzierter Klimagrößen einer lückenhaften Ausgangsdatenbasis Rechnung trägt. Wesentliches Ziel des Konzeptes ist die Bereitstellung von Grundlagen einer physikalisch fundierten und räumlich detaillierten Beschreibung des Regionalklimas komplexer Mittelgebirgslandschaften wie z. B. des Osterzgebirges.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Regionalisierungskonzept

In Abbildung 1 (Beilage IX) ist das Konzept für die Regionalisierung von Klimagrößen in einer kleinräumig heterogenen Mittelgebirgslandschaft mit lückenhafter empirischer Ausgangsdatenbasis dargestellt. Das Konzept besteht aus zwei Etappen:

- In einem ersten Schritt (Datengenerierung) werden räumlich hochaufgelöste und konsistente Punktdaten verschiedener Klimaelemente erzeugt. Die Berechnung dieser Punktdaten erfolgt zum einen auf der Grundlage von Regressionsansätzen, mittels derer empirisch erfasste Ausgangsdaten (z. B. aus Meteorologischen Jahrbüchern) in eine Beziehung zur Seehöhe gesetzt ( $KG \text{ (Klimagröße)} = f(H)$ , mit  $H$ -Höhe über NN) und die Ergebnisse räumlich verallgemeinert werden. Zum anderen werden mit einem Strahlungsmodell bzw. einem Vegetations-Atmosphären-Modell (HIRVAC) Datensätze zu den Strahlungsbilanzkomponenten ( $R_N$ ) bzw. zu wesentlichen Klimaelementen wie z. B. Temperatur ( $t$ ), Feuchte (RF) und Wind ( $v_H$ ) erzeugt und in eine Beziehung zur Geländegeometrie und optionell zur Landnutzung gesetzt ( $KG = f(\alpha, \psi, LN)$ ), mit  $\alpha, \psi$ -Hangneigung, Hangazimut und LN-Landnutzung).

- In einem zweiten Schritt werden die auf empirischer und theoretischer Datengrundlage erzeugten Punktinformationen durch Verknüpfung von Übertragungsfunktionen ( $KG = f(H, \alpha, \psi, LN)$ ) mit einem digitalen Geländemodell (DGM) auf ein reales Gebiet abgebildet („bottom-up“-Verfahren). Hängt die Übertragungsfunktion nur von der Seehöhe ab, weisen die in der Klimakarte dargestellten Daten regionalen Charakter auf, wie z. B. die klimatologische Jahrestemperatur (linke Karte in Abb. 1; Beilage IX); bei Abhängigkeit von der Geländegeometrie zeigen die Ergebniskarten Klimagrößen mit kleinräumig differenzierten Eigenschaften, wie z. B. das Tagesmaximum der Lufttemperatur (rechte Karte in Abb. 1; Beilage IX). Ein weiteres Beispiel für den zweiten Typ wäre eine Temperaturverteilung unter Berücksichtigung der realen Landnutzung (hier nicht dargestellt).

Die in Abbildung 1 (Beilage IX) gezeigten Ergebnisse stehen beispielhaft für eine größere Zahl von Anwendungsmöglichkeiten des Konzeptes auf andere Klimagrößen und die Übertragbarkeit in andere Regionen. Im folgenden werden die Teilschritte des Regionalisierungskonzeptes in seiner Anwendung auf die Region Osterzgebirge näher vorgestellt.

## 2.2 Empirischer Ansatz

Grundlage für den empirischen Ansatz ist ein historischer Datensatz (1901–1950) der Jahrestemperatur (MD DDR 1950–1990; MD DDR und HMU CSSR 1973) und ein aktueller Datensatz (1971–1994) für den Niederschlag (MD DDR 1950–1990 und DWD 1994–1997). Die Anzahl der Datenpunkte (Temperatur: 37, Niederschlag: 12) ist unter der Annahme einer Klimakonstanz der Höhengradienten für die Aufstellung von linearen Regressionsbeziehungen ausreichend. Für die Jahreswerte der Lufttemperatur  $t_{\text{year}}$  bzw. des nach RICHTER (1995) korrigierten Niederschlages  $P_{\text{Met}}$  ergeben sich danach die Beziehungen:

$$t_{\text{year}} = 9,1^{\circ}\text{C} - (0,50^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m})H$$

bzw.

$$P_{\text{Met}} = 626 \text{ mm} + (63,8 \text{ mm} / 100 \text{ m})H$$

mit  $t_{\text{year}}$  – Jahresmittel der Lufttemperatur,  $P_{\text{Met}}$  – Jahresniederschlag.

Die Varianz der Klimadaten ( $r^2$ ) lässt sich mit hoher Bestimmtheit (Temperatur: 80,4%, Niederschlag: 91,2%) aus der linearen Abhängigkeit von der Seehöhe erklären. Die Restvarianz, die z. T. durch die lokalen Einflüsse im Umfeld der Klimastationen erklärbar ist, kann nur durch den Einsatz von komplexen meteorologischen Modellen beschrieben werden, die die Geländeographie berücksichtigen.

## 2.3 Theoretischer Ansatz

### 2.3.1 Strahlungsmodell

Alle Strahlungskomponenten zeigen neben der Abhängigkeit von der Seehöhe eine starke Beeinflussung durch kleinräumige Geländeunterschiede. Da die reliefbedingten Unterschiede hauptsächlich aus der Variabilität in der Geländegeometrie (Hangneigung, Hangazimut) resultieren, können mehrere Komponenten der Strahlungsbilanz im komplexen Gelände gut mit Modellen beschrieben werden. Häufig wird der Einfluß des Reliefs auf die direkte (Sonnen-)strahlung untersucht, um die ökologisch bedeutsamen Besonnungs- und Abschattungszeiten unterschiedlicher Hanglagen abzuschätzen (z. B. JUNGHANS 1965; LESER u. KLINK 1988).

Zur Berechnung aller Strahlungskomponenten (direkte Strahlung, diffuse Himmelsstrahlung, Reflexstrahlung) wurden im vorliegenden Regionalisierungskonzept Ansätze aus der Literatur (JUNGHANS 1969; KONDRATYEV 1977 und VDI-Richtlinie-3789 1992) zusammengefasst und für die Anwendung im Unter-

suchungsgebiet adaptiert (GOLDBERG 1999). Mit dem daraus resultierenden Strahlungsmodell (GISRAD) kann in einem vereinfachten Gelände (glatte Hänge, keine Abschattung durch sichtbare Geländeabschnitte, Vernachlässigung der Reflexion gegenüberliegender Hänge) die Strahlungsbilanz geneigter Oberflächen für einen beliebigen geographischen Punkt zu einer beliebigen Zeit berechnet werden. Für die praktische Bestimmung verschiedener Strahlungsgrößen werden z. B. Nomogramme verwendet (Beispiele im Ergebnisteil), die in Abhängigkeit von der Wahl charakteristischer Geländeklassen erstellt werden.

### 2.3.2 Temperaturberechnung

Die Charakterisierung der geländeabhängigen Temperaturvariationen basiert auf Ergebnissen des Modells HIRVAC. HIRVAC (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler) ist ein 1,5-dimensionales atmosphärisches Grenzschichtmodell mit hoch aufgelöster Vegetationsschicht (basierend auf dem Grenzschichtmodell nach MIX et al. (1994), modifiziert von ZIEMANN (1998) und GOLDBERG (1999)). Das physikalische Prinzip dieses Modells besteht darin, die sogenannten Grundgleichungen des turbulenten Regimes der Atmosphäre (Bewegungsgleichung, Kontinuitätsgleichung, statische Grundgleichung, thermodynamische Gleichung und Feuchtegleichung) mit einer bestimmten zeitlichen Auflösung für eine begrenzte Anzahl von Modellschichten numerisch zu lösen. Im Modell HIRVAC werden im Allgemeinen 120 Modellschichten verwendet, die sich in einem geometrischen Abstand (d. h. zunehmender Abstand mit der Höhe) im Bereich von 0–2 km erstrecken. Die Vegetation wird im Höhenbereich von 0–30 m mit einer Auflösung von etwa 60 Schichten als zusätzlicher Quell- bzw. Senkenterm für Impuls, Wärme und Feuchte berücksichtigt. Dabei können die vertikale Struktur der Vegetation und die vom Vegetationstyp abhängigen Austauschbedingungen mit der Atmosphäre variabel vorgegeben werden. Die Strahlungsgrößen werden über ein Strahlungsmodell (s. Abschnitt 2.3.1) in Abhängigkeit von der Geländeographie berechnet und liefern den energetischen Antrieb des Modells HIRVAC.

Als wesentliches Ergebniss liefert das Modell HIRVAC Tagesgänge der Vertikalprofile von Temperatur, Feuchte und Wind sowie der daraus abgeleiteten Flüsse fühlbarer und latenter Wärme (Verdunstung) für den Bereich der atmosphärischen Grenzschicht von 0–2 km. Die Verdunstung und der Strom fühlbarer Wärme bilden mit den Komponenten der Strahlungsbilanz und dem Bodenwärmestrom die Energiebilanz am Erdboden, die maßgeblich die Lufttemperatur in

Bodennähe bestimmt. Alle Komponenten der Energiebilanz werden bei der Berechnung des Temperaturfeldes im Modell HIRVAC explizit berücksichtigt.

Zur Erstellung einer exemplarischen Temperaturkarte wurden für den 21. März Simulationen mit dem Modell HIRVAC für beliebige Kombinationen von Hangneigung und Hangazimut sowie zwei wesentliche Landnutzungstypen (Fichtenwald und Grasland) durchgeführt. Die aus den Modellergebnissen (Tagesgänge) ableitbaren Temperaturextrema wurden mit den Geländeparametern in "Look-up-tables" zusammengestellt. Diese Tafeln sind Grundlage für die Abbildung der Modellergebnisse in einem GIS (Geographisches Informationssystem) des Testgebietes Osterzgebirge.

### 2.3.3 Hydrologischer Niederschlag

Der empirische Ansatz (siehe Abschnitt 2.2) beschreibt den durch atmosphärische Prozesse bedingten meteorologischen Niederschlag (SCHNEIDER-CARIUS 1957), der im Allgemeinen durch eine standardisierte Niederschlagsmessung (d. h. horizontale Aufstellung) erfasst wird. Für viele Anwender (z. B. in der Hydrologie) besteht aber das Interesse an der tatsächlich einem Hang zugeführten Wassermenge. Diese Größe wird nach SCHNEIDER-CARIUS (1957) als hydrologischer Niederschlag bezeichnet und hängt von der Windverteilung bei Niederschlagsereignissen, der Niederschlagsmenge und den geometrischen Eigenschaften des Geländes ab. Diese auch als Hangniederschlag bezeichnete Größe kann mit hangparalleler Aufstellung von Standard-Niederschlagsmessgeräten erfasst werden (SEVRUK 1972). Einen trigonometrischen Ansatz zur Berechnung des hydrologischen Niederschlags in einem vereinfachten komplexen Gelände (vgl. Abschnitt 2.1) gibt JUNGHANS (1967). Bei GOLDBERG (1999) werden die Ansätze für eine Anwendung im Osterzgebirge modifiziert (Hangniederschlagsmodell GISRAIN).

Für eine langfristige Wind- und Niederschlagsverteilung gilt folgende Beziehung:

$$P_{\text{Hydro}} = P_{\text{Met}} [1 + k_1 \tan \alpha \sin(\tau + k_2)]$$

mit  $P_{\text{Hydro}}$  und  $P_{\text{Met}}$  – hydrologischer und meteorologischer Niederschlag (z. B. Jahresniederschlag, vgl. Abschnitt 2.2) sowie  $\alpha$  und  $\psi$  – Hangneigung und Hangazimut.

Die Koeffizienten  $k_1$  bzw.  $k_2$  beschreiben Betrag bzw. Richtung des „Einfallsvektors“ des Niederschlages auf die Hangfläche. Ihr Wert berechnet sich aus der Windverteilung (Richtung und Geschwindigkeit) bei Niederschlagsereignissen und der Niederschlagsintensität

(Fallgeschwindigkeit der Niederschlagsteilchen). Die Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  können für einzelne Niederschlagsereignisse oder für eine Niederschlagsperiode berechnet werden. Im zweiten Fall wird aus den Einzelereignissen der Periode ein mit der jeweiligen Niederschlagsmenge gewichtetes Mittel gebildet. Voraussetzung für diese Vorgehensweise sind kontinuierlich registrierende Niederschlagsstationen.

Bei Anwendung von GISRAIN auf ein topographisch gegliedertes Gelände muß zusätzlich die Höhenabhängigkeit der Windverteilung betrachtet werden. Die Auswertung von Winddaten der Klimastationen im Osterzgebirge zeigt neben der generellen Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe eine Drehung der Hauptwindrichtung von Südwest auf Nordwest (FLEMMING 1982 und 1986).

Für die Sommerhalbjahre (April bis September) 1996 und 1997 wurden auf Basis der Wind- und Niederschlagsdaten der vom Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden betreuten Klimastationen die Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  berechnet. Dabei wurde eine lineare Höhenänderung der Parameter angenommen:

$$k_1 = 0,09454 + (0,00005/\text{m})H$$

$$k_2 = 0,44301 - (0,00141/\text{m})H$$

Mit den Ansätzen zur Parametrisierung des hydrologischen Niederschlages kann die hydrologisch bedeutsame Wassermenge, die einem Hang zugeführt wird, ohne Spezialmessungen realistisch bestimmt werden.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Nomogramme zur kurzwelligen Strahlung

Aus meteorologischer Sicht ist die kurzwellige Einstrahlung eine immanent wichtige Größe, da sie den energetischen Antrieb für atmosphärische Prozesse in allen räumlichen und zeitlichen Skalenbereichen liefert. Dabei stellt die potentielle kurzwellige Einstrahlung eine Obergrenze für die maximal einer Oberfläche zuführbare solare Energie dar. Sie ist mit Modellansätzen relativ genau ermittelbar und hat neben der Schlüsselstellung unter den Klimagrößen auch für andere Fachgebiete wie die Energiewirtschaft (Solarenergie), die Hydrologie (Verdunstungsberechnung) und die Land- und Forstwirtschaft (Strahlungstoleranz von Kulturpflanzen und Nutzbaumarten) Bedeutung. Die folgenden Ergebnisse stellen Beispiele eines Gesamtkataloges an möglichen bzw. in GOLDBERG (1999) publizierten Nomogrammen dar.

Die Abbildung 2 zeigt den Tages- und Jahresgang der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung an einem

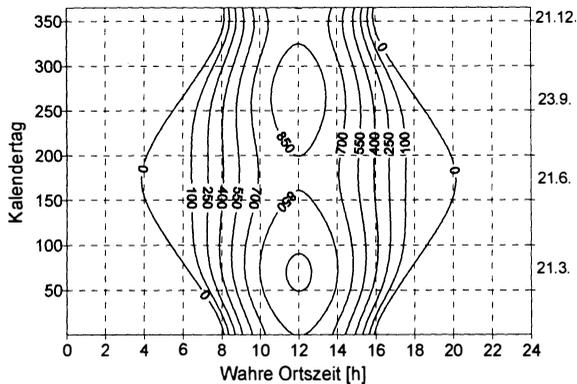


Abb. 2: Potentielle kurzwellige Einstrahlung  $[W/m^2]$  an einem Südhang mit  $60^\circ$  Neigung zu beliebiger Tages- und Jahreszeit für die geographische Breite von Altenberg / Osterzgebirge

Potential shortwave radiation  $[W/m^2]$  on a with 60 degrees inclined and southward orientated surface for the latitude of Altenberg/Eastern Ore Mountains

Südhang mit  $60^\circ$  Neigung. Deutlich kommt die für äquatorial ausgerichtete Hanglagen typisch hohe Einstrahlung in den Mittagsstunden zum Ausdruck. Die Maximalwerte werden in den Übergangsjahreszeiten bei senkrechtem Strahlungseinfall erreicht. Eine Asymmetrie zum Sonnenhöchststand (21.6.) resultiert aus dem zur Sommersonnenwende phasenverschobenen Jahresgang der Lufttrübung, die den Betrag der kurzwelligen Einstrahlung beeinflusst. So liegt das Jahresmaximum im zeitigen Frühjahr, wo gegenüber dem Herbst im Allgemeinen geringere Lufttrübungen anzutreffen sind.

Neben Momentanwerten der Einstrahlung werden für bestimmte Anwendungen (z. B. Wachstums- und Verdunstungsmodellierung) oft die Tagessummen der kurzwelligen Einstrahlung benötigt. Die Abbildung 3 zeigt den Jahresgang der Tagessummen für beliebige, um  $60^\circ$  geneigte Hanglagen relativ zur Tagessumme der Globalstrahlung. Das Nomogramm verdeutlicht den saisonal unterschiedlichen Einfluss der Hangexposition auf die kurzwellige Einstrahlung. So sind die Unterschiede zur Globalstrahlung (Einstrahlung auf Horizontalebene) und zwischen den Hangexpositionen in den Sommermonaten relativ gering und nehmen mit abnehmendem Sonnenstand deutlich zu. Am 21. Dezember erhalten steile Südhänge ca. das Dreieinhalbfache der Globalstrahlung, Nordhänge gleicher Neigung jedoch nur ca. ein Fünftel. Die dargestellten Relativwerte eignen sich gut für die Übertragung von beliebigen, an wolkenlosen Tagen gemessenen Globalstrahlungssummen auf geneigte Ebenen.

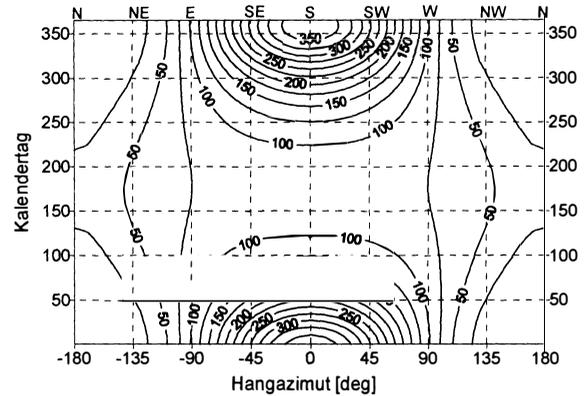


Abb. 3: Verhältnis der Tagessummen potentieller kurzwelliger Einstrahlung auf Hängen mit  $60^\circ$  Neigung und der Horizontalebene [%]

Relation of the daily sum between the potential shortwave radiation on with 60 degrees inclined surfaces and the horizontally orientated plane

### 3.2 Kurzwellige Strahlung unter Bewölkungseinfluss

Um eine Aussage über tatsächlich aufgenommene Strahlungsmengen zu erhalten, muss der Einfluss der Bewölkung auf die kurzwellige Einstrahlung berücksichtigt werden. Im vorgestellten Strahlungsmodell geschieht das in einfacher Weise mit den Parametern Wolkenalbedo und Wolkenbedeckungsgrad. Dabei werden die Ansätze zur direkten und diffusen Einstrahlung für den wolkenlosen und bedeckten Fall (VDI-Richtlinie-3789 1992) unter Verwendung des aktuellen Wolkenbedeckungsgrades linear gewichtet:

$$K_{W,nc} = n_c D_1 + (1 - n_c)(I_0 + D_0)$$

mit  $K_{W,nc}$  – kurzwellige Einstrahlung unter Bewölkungseinfluss,  $n_c$  – Wolkenbedeckungsgrad (0 – wolkenlos ... 1 – bedeckt),  $I_0$  – direkte Strahlung bei wolkenlosem Himmel,  $D_0$  bzw.  $D_1$  – diffuse Strahlung bei wolkenlosem bzw. bedecktem Himmel.

Die Wolkenalbedo wird für die Parametrisierung der Rückstreuung bei Mehrfachreflexion verwendet und hängt von Wolkendichte und Wolkentyp ab. Für erste Rechnungen mit dem Modell GISRAD wurde eine einheitliche Wolkenalbedo von 50% angenommen (typischer Wert für tiefe und mittelhohe Bewölkung, siehe LILJEQUIST u. CEHAK 1984).

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich mit zunehmender Bewölkung die Unterschiede zwischen den Expositionen verringern. Ein Vergleich mit Messwerten verdeutlicht, dass die Güte der Parametrisierung von Wolkentyp und Wolkenmächtigkeit abhängt. Für

relativ dünne stratiforme Bewölkung stimmen die Modellergebnisse gut mit Messwerten überein. Bei optisch dicken Wolken zeigen sich größere Abweichungen, so dass hier eine komplexere Wolkenparametrisierung erforderlich ist.

### 3.3 Kleinräumige Verteilung von Strahlung, Temperatur und Niederschlag im Osterzgebirge

#### 3.3.1 Lage und Topographie des Testgebietes

Das Testgebiet befindet sich in den Hoch- und Kammlagen des Osterzgebirges im südlichen Bereich des Freistaates Sachsen (DGM des LVA Sachsen (1996), Abb. 1; Beilage IX). Die Topographie ist einerseits durch Hochebenen, flach geneigte Hänge, Täler und Mulden, andererseits durch tiefe Taleinschnitte (z. B. Tal der Wilden Weisseritz), Basaltkuppen (z. B. Geisingberg) und bergbaulich bedingte Einbrüche (z. B. Altenberger Pinge) geprägt. In den Hochlagen dominieren Fichtenreinbestände, die in den Kammlagen infolge starker Immissionsschäden größtenteils abgestorben und durch niedrigere Vegetation, wie Grasland ersetzt wurden. Das Gebiet ist nur dünn besiedelt, größter Ort ist die Stadt Altenberg (5000 Einwohner).

Das charakteristische Relief und die Landnutzung bedingen eine Vielzahl kleinräumiger Klimaunterschiede, die mit den oben beschriebenen Regionalisierungsansätzen charakterisiert und in einigen Beispielkarten vorgestellt werden (Koordinateneinteilung der Karten: Gauß-Krüger-System, 3°-Meridian-Streifen-System, Bessel-Ellipsoid).

#### 3.3.2 Potentielle kurzweilige Strahlung

In Abbildung 4 (Beilage IX) ist die Jahressumme der potentiellen kurzweiligen Einstrahlung im Testgebiet dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass markante Reliefeinschnitte bzw. -erhebungen (z. B. im Bereich der Altenberger Pinge bzw. des Geisingberges) zu deutlichen Unterschieden in den Beträgen der kurzweiligen Einstrahlung führen.

So schwanken die Beträge der maximal möglichen Einstrahlung zwischen minimal 271 und maximal 810 KJ/cm<sup>2</sup>, d. h. um etwa das Dreifache. Diese Extremwerte entsprechen 45% bzw. 136% der Jahressumme der potentiellen Globalstrahlung (Klimastation Lugstein). Das Flächenmittel der kurzweiligen Einstrahlung ist etwas niedriger als die mittlere Globalstrahlung, was auf die höhere Anzahl von nördlich orientierten Hanglagen mit ihrer geringeren Einstrahlung zurückzuführen ist (Nordabdachung des Erzgebirges).

#### 3.3.3 Tagesmaximum der Lufttemperatur

Auf Basis von Look-up-tables (vgl. Abschnitt 2.3.2) wurden die Temperaturextrema für den 21. März in das GIS des Testgebietes übertragen. In den Abbildungen 5a und 5b (Beilage IX) sind beispielhaft die Tagesmaxima der Lufttemperatur in 2 m Höhe („Hütten-temperatur“) im Osterzgebirge dargestellt. Es wurde uniforme Landnutzung angenommen (Abb. 5a: Fichte, Abb. 5b: Grasland; Beilage IX). Die Ergebnisse verdeutlichen sowohl den Einfluss der Geländegeometrie als auch der Oberflächenbedeckung auf die Temperatur. Zum einen tritt eine ähnliche Differenzierung zwischen den Hanglagen wie bei der kurzweiligen Strahlung auf, zum anderen unterscheiden sich die Absolutwerte und Extrema der Temperaturmaxima zwischen den Oberflächentypen. So beträgt die Amplitude der Maxima bei Fichte ca. 24 K, über Wiese jedoch ca. 43 K – ein Ausdruck für die bezüglich der Temperatur ausgleichende Wirkung des Waldes. Im Flächenmittel differiert die im geschlossenen Fichtenbestand berechnete Maximumtemperatur gegenüber den über Wiese ermittelten Werten um ca. 10 K (Fichte: 1,4 °C, Wiese: 11,6 °C).

#### 3.3.4 Hydrologischer Niederschlag

Der hydrologische Niederschlag ( $P_{\text{Hydro}}$ ) des Testgebietes wurde mit den Gleichungen aus Abschnitt 2.3.3 berechnet. In Abbildung 6 (Beilage IX) ist mit dem relativen hydrologischen Niederschlag ( $P_{\text{Hydro}} / P_{\text{Met}}$ ) eine verallgemeinerbare und damit für beliebige Niederschlagswerte übertragbare Größe dargestellt. In den Ergebnissen tritt deutlich der Einfluss der Luv- und Leehänge im Bereich der nord-südlich ausgerichteten Täler des Testgebietes hervor. Markante Unterschiede sind auch zwischen unterschiedlich ausgerichteten Steilhanglagen (z. B. im Bereich von Altenberger Pinge und Geisingberg) erkennbar. Durch den Einfluss der Geländegeometrie erhalten windzugewandte Hanglagen bis zu 15% höhere, windabgewandte Hanglagen bis zu 16% weniger Niederschlag als eine Horizontalebene. Dieser Unterschied ist z. B. für hydrologische Anwendungen (Wasserhaushalts-Modellierung u.ä.) nicht vernachlässigbar.

## 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das vorgestellte Konzept prinzipiell geeignet ist, in einem Gebiet mit lückenhafter Ausgangsdatenbasis wesentliche Klimagrößen für beliebige Zeitpunkte und eine beliebige

Geländegeometrie zu regionalisieren. Dabei werden neben empirisch bestimmten Höhengradienten bekannte Modellansätze zu Strahlung und Niederschlag aufgearbeitet und für das konkrete Untersuchungsgebiet angepasst sowie Zusammenhänge zwischen Klimagröße und Geländeparametern (Geometrie, Landnutzung) aus Modellergebnissen (z. B. zur Temperatur) abgeleitet.

Die verwendete vereinfachte Geländegeometrie (glatte Hänge, keine Gegenhänge) liefert für den Großteil des betrachteten Testgebietes mit vornehmlich geringen Hangneigungen realistische Ergebnisse für die potentielle kurzweilige Einstrahlung. Bei stärkeren Hangneigungen spielen Abschattungseffekte durch Gegenhänge besonders bei niedrigen Sonnenständen eine nicht zu vernachlässigende Rolle (JUNGHANS 1969), so dass die Strahlungssummen (Abb. 4; Beilage IX) überschätzt werden. Dennoch demonstrieren die mit dem vorliegenden Modell berechneten Werte den großen Einfluss kleinräumiger Geländeunterschiede auf die potentielle kurzweilige Einstrahlung.

Die vom konkreten Gelände unabhängigen Nomonogramme zur kurzweiligen Einstrahlung liegen bereits in anwendungsorientierter Form vor (GOLDBERG 1999) und können als Arbeitsmaterial genutzt werden, z. B. für Wasserhaushaltsmodelle und Waldumbaustrategien. Für den Waldumbau könnte sich bspw. die Konsequenz ergeben, die Artenwahl anhand der geländeabhängigen Lichtverhältnisse vorzunehmen. So sind z. B. für strahlungsärmere Hanglagen mit nördlicher Orientierung schattentolerante Arten wie Buche und Fichte, für strahlungsreiche südliche Hanglagen lichttolerante Arten wie Eiche und Kiefer zu bevorzugen.

Der Bewölkungseinfluss auf die Strahlungsverteilung wird relativ einfach über Bedeckungsgrad und Wolkenalbedo parametrisiert. Das führt besonders bei optisch dichter Bewölkung zu teilweise größeren Abweichungen der Modellergebnisse gegenüber Messwerten. Für die Erstellung von klimatologischen Strahlungskarten muss die Wolkenparametrisierung im Modell erweitert werden.

Die Darstellung der Maximumtemperatur des Testgebietes eines exemplarischen Modelltages zeigt beispielhaft die Möglichkeit, Klimagrößen in das Regionalisierungskonzept einzubeziehen, die im Allgemeinen nicht auf der Basis von klimatologischen Routinemessungen regionalisiert werden können, für Anwender anderer Fachgebiete jedoch von großem Interesse sind. Dabei wird der Einfluss von Relief und Landnutzung auf die Extremwerte der Lufttemperatur durch die Simulationen mit dem Grenzschichtmodell prinzipiell richtig wiedergegeben. Die für den 21. März und maximale Einstrahlungsbedingungen erstellten

Karten zur Maximumtemperatur im Testgebiet verdeutlichen die Abhängigkeit der Temperaturextreme vom kleinräumigen Relief und vom Oberflächentyp. So beträgt die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Maximum bei einheitlichem Bewuchs mit Fichte etwa 24 K, bei uniformer Landnutzung mit Wiese etwa 43 K. Die im Rahmen der Studie nicht einbezogene reale Landnutzung (PRECHTEL 1996) würde zu einer weiteren Differenzierung der Extremtemperaturen führen. In weiterführenden Studien müssen zusätzlich horizontale Ausgleichsströmungen einbezogen werden, da die mit dem Modell HIRVAC berechneten Extremtemperaturen für steile Geländeabschnitte unrealistische Werte annehmen.

Mit dem hydrologischen Niederschlag wird eine weitere mit Routinedaten nicht erfasste Klimagröße in das Regionalisierungskonzept einbezogen. Das Verhältnis zwischen dieser aus geometrischen Ansätzen berechneten Niederschlagsgröße mit dem im Allgemeinen gemessenen meteorologischen Niederschlag ist gleichzeitig ein Maß für die unterschiedliche effektive Wasseraufnahme kleinräumiger Geländeabschnitte. Der hydrologische Niederschlag hat vor allem für kleine Wassereinzugsgebiete Bedeutung und sollte dort in Wasserhaushaltsuntersuchungen berücksichtigt werden. Für das Testgebiet in den Hochlagen des Osterzgebirges wurden Abweichungen im Hangniederschlag von etwa 31% zwischen extremen Luv- und Leehängen ermittelt. Der Einfluss der Windfelddeformation in Erdbodennähe und die Rolle der Interzeption bei der Wasseraufnahme im vegetationsbedeckten Gelände wurden nicht berücksichtigt, müssen jedoch bei der operationellen Anwendung der Modellansätze beachtet werden.

Die Verwendung von „GIS-kompatiblen“ Oberflächen- und Geländeparametern wie Seehöhe, Hangneigung, Hangazimut und Landnutzungs-kategorie in den Modellansätzen ermöglicht eine problemlose Verschneidung mit beliebigen digitalen Geländeinformationen, die Implementation in eine GIS-Umgebung und eine Anwendung auf andere Gebiete mit ähnlicher Orographie.

#### *Danksagung*

Die Erfassung und Analyse der Klimadaten wurde im Rahmen des BMBF-Projektes „Waldumbau Erzgebirge“, Förderkennzeichen 0339464B, finanziell gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

## Literatur

- DWD, Deutscher Wetterdienst: Deutsches Meteorologisches Jahrbuch 1994–1997. Offenbach.
- FLEMMING, G. (1982): Die Windgeschwindigkeit als Verstärkungsfaktor für Rauchsäden im Wald in Abhängigkeit von Waldaufbau und Relief. In: *Z. Meteorol.* 32, 14–22.
- (1986): Der Einfluß stufentrepfenartig ansteigender Waldbestände (Schlagreihen) auf die Windgeschwindigkeit in ihrer Rolle als Verstärkungsfaktor für Immissionssäden. In: *Z. Meteorol.* 36, 27–35.
- (1993): Klima und Immissionsgefährdung des Waldes im Osterzgebirge. In: *Arch. für Nat. - Lands.* 32, 273–284.
- GOLDBERG, V. (1997): Regionalisierung meteorologischer Größen im Osterzgebirge. In: *Wetter und Leben* 49, 153–167.
- GOLDBERG, V. u. BERNHOFER, CH. (1998 a): Methoden zur Regionalisierung des Standortklimas. In: NEBE, W.; ROLOFF, A. u. VOGEL, M. (Hg.): Untersuchungen von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau. *Forstwiss. Beitr. Tharandt* 4, Dresden, 175–180.
- (1998 b): Zum Klima des Osterzgebirges als Erholungslandschaft. In: *Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden* 47, 89–95.
- (1999): Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern. *Tharandter Klimaprotokolle* 2, Dresden.
- GOLDBERG, V.; FRÜHAUF, C.; BERNHOFER, CH.; WIENHAUS, O.; ZIMMERMANN, F. u. SEELIG, U. (1998): Regional- und Lokalklima des Osterzgebirges. In: NEBE, W.; ROLOFF, A. u. VOGEL, M. (Hg.): Untersuchungen von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau. *Forstwiss. Beitr. Tharandt* 4, Dresden, 28–38.
- JUNGHANS, H. (1965): Die effektiv mögliche Sonnenscheindauer von Hanglagen. In: *Wiss. Z. d. Techn. Univ. Dresden* 14, 443–448.
- (1967): Der Niederschlag auf geneigte Flächen. In: *Z. f. Angew. Met.* 5, 222–226.
- (1969): Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. *Abh. des Meteorol. Dienstes der DDR* 85, Berlin.
- KONDRATYEV, K. YA. (1977): Radiation regime of inclined surfaces. *WMO Techn. Note* 152, Genf.
- LVA Sachsen (1996): Verzeichnis der Karten und digitalen Daten, Dresden.
- LESER, H. u. KLINK, H.-J. (Hg.) (1988): *Handbuch und Kartieranleitung – Geoökologische Karte 1:25000. Forschungen zur deutschen Landeskunde* 228, Trier.
- LILJEQUIST, G. H. u. CEHAK, K. (1984): *Allgemeine Meteorologie*. Vieweg Braunschweig.
- Meteorologischer Dienst der DDR: *Meteorologisches Jahrbuch der DDR, Jg. 1950–1990*, Potsdam.
- Meteorologischer Dienst der DDR u. Hydrometeorologický ústav CSSR (1973): *Klima und Witterung im Erzgebirge. Abh. des Meteorol. Dienstes der DDR* 104, Berlin.
- MIX, W.; GOLDBERG, V. u. BERNHARDT, K.-H. (1994): Numerical experiments with different approaches for boundary layer modeling under large-area forest canopy conditions. In: *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 3, 187–192.
- PRECHTEL, N. (1996): Flächennutzungskartierung mit Satellitendaten. In: *Wiss. Z. d. Techn. Univ. Dresden* 45, 62–66.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Ber. DWD* 194, Offenbach a. M.
- SCHNEIDER-CARIUS, K. (1957): Grundsätzliches zur Definition der Niederschlagshöhe bei Niederschlagsmessungen. In: *La Météorologie* 45, 111–115.
- SEVRUK, B. (1972): Vergleichende Niederschlagsmessung mit hangparallelen Auffangflächen auf der Cape au Moine. In: *Wetter und Leben* 24, 190–197.
- STEINHARDT, U. (1998): Dimensionen und Skalen in der Geoökologie. In: *Forum Geoökologie* 9, H. 3, 8–11.
- STEINHARDT, U. u. VOLK, M. (Ed.) (1999): *Regionalisierung in der Landschaftsökologie*. Stuttgart Leipzig.
- VDI – Richtlinie- 3789 (1992): *Umweltmeteorologie. Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung*. Berlin.
- ZIEMANN, A. (1998): Numerical simulation of meteorological quantities in and above forest canopies. In: *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 7, 120–128.

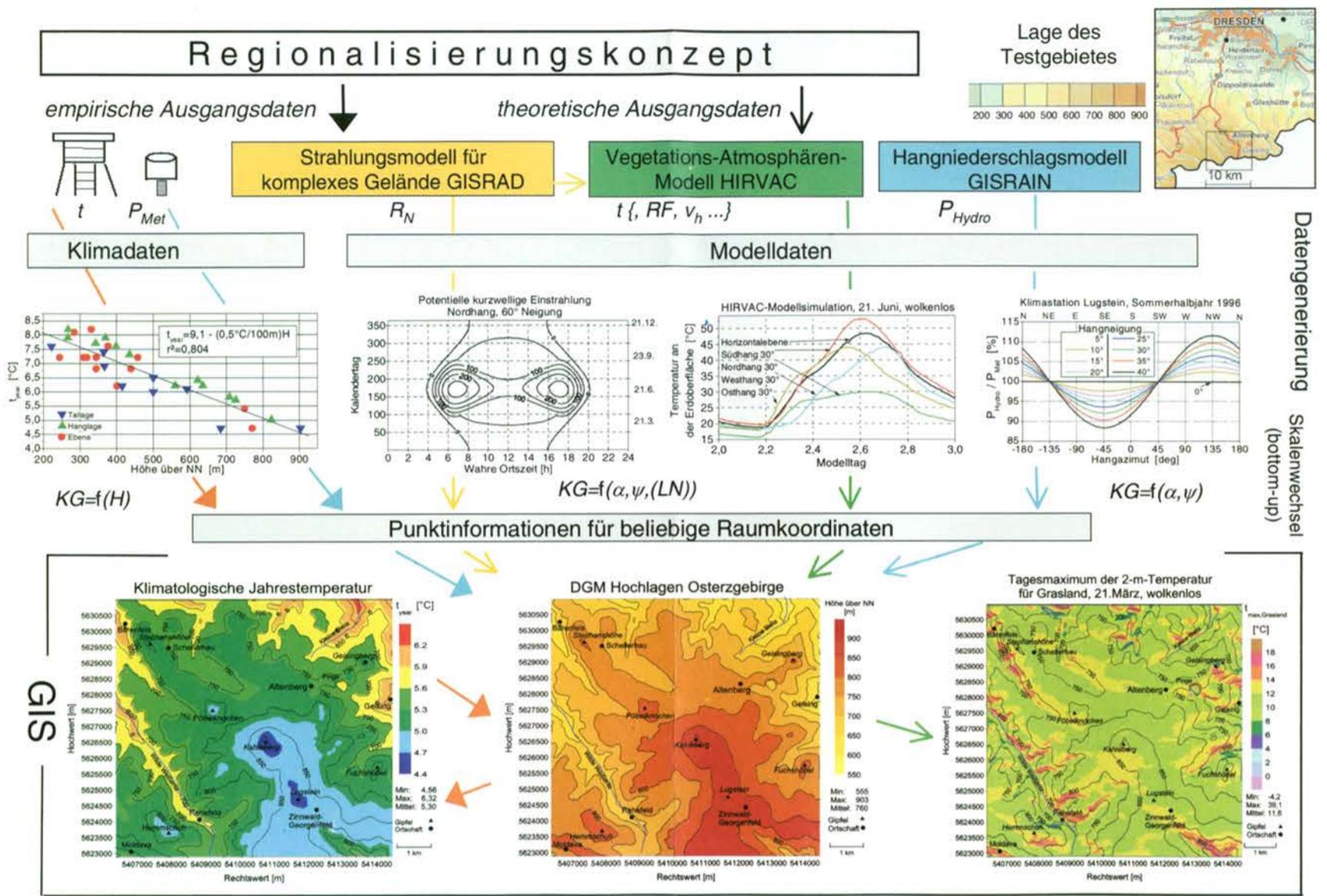


Abb. 1: Regionalisierungskonzept  
Concept of regionalization

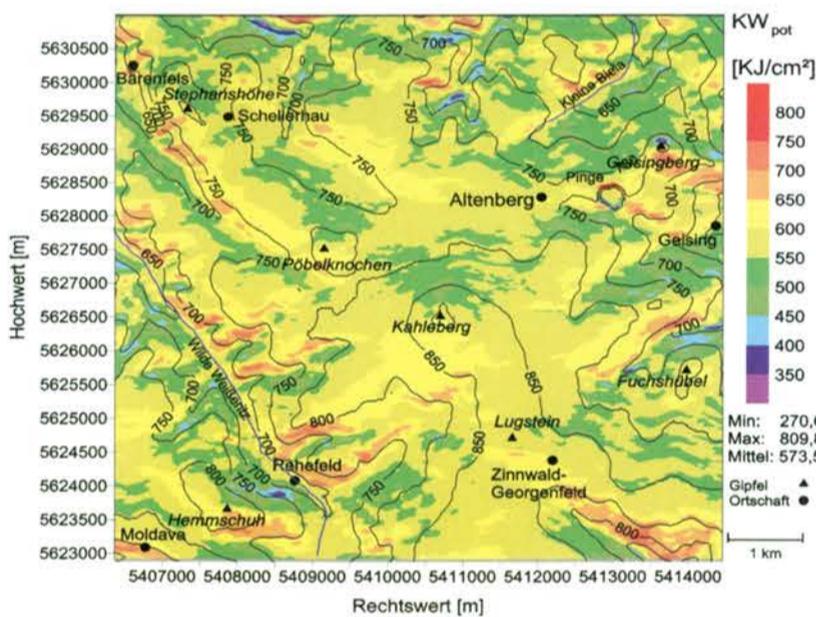


Abb. 4: Jahressumme der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung in den Hochlagen des Osterzgebirges am 21. März, 12.00 Uhr wahrer Ortszeit  
Annual sum of potential shortwave radiation in the upper sites of the Eastern Ore Mountains at March 21, 12 a.m. local time

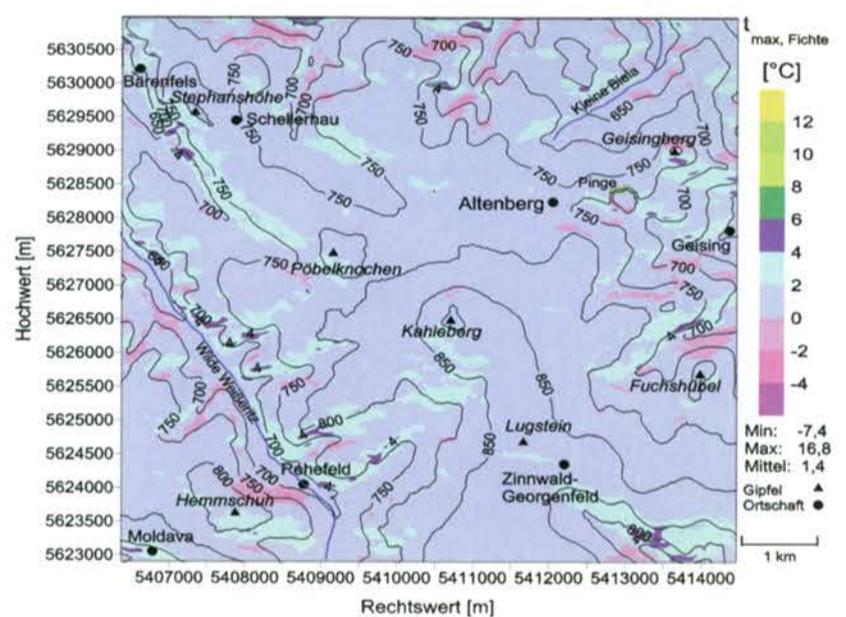


Abb. 5a: Tagesmaximum der Lufttemperatur in 2 m Höhe in den Hochlagen des Osterzgebirges am 21. März bei wolkenlosen Verhältnissen. Landnutzung: **Fichte**.  
Daytime maximum of air temperature in the 2-m-level: upper sites of the Eastern Ore Mountains at March 21, clear sky conditions. Landuse: **spruce**.

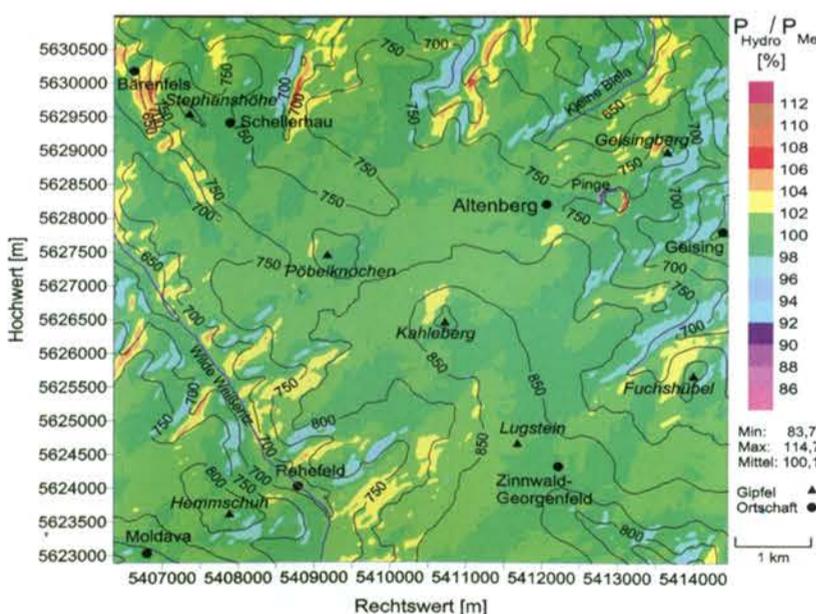


Abb. 6: Hydrologischer Niederschlag im Verhältnis zum meteorologischen Niederschlag in den Hochlagen des Osterzgebirges.  
Hydrological precipitation in relation to the meteorological precipitation in the upper sites of the Eastern Ore Mountains.

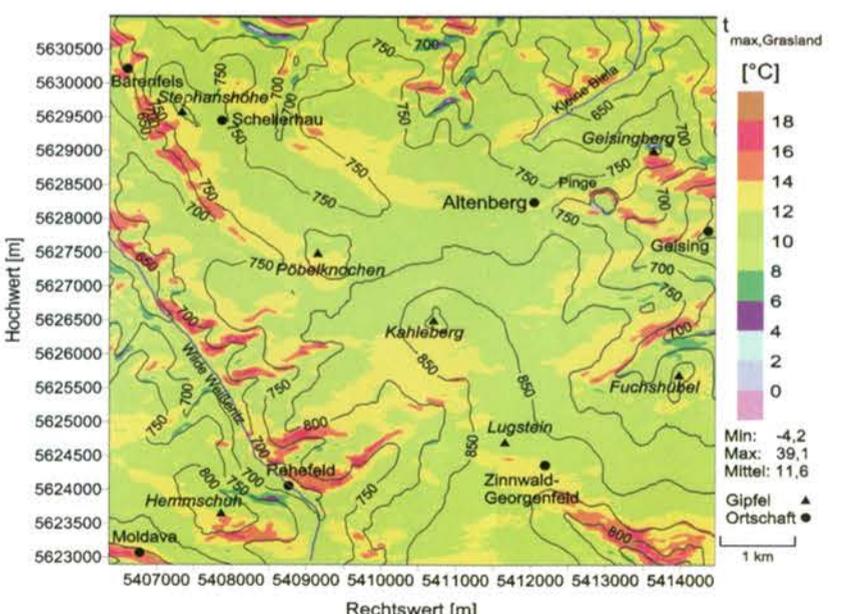


Abb. 5b: Tagesmaximum der Lufttemperatur in 2 m Höhe in den Hochlagen des Osterzgebirges am 21. März bei wolkenlosen Verhältnissen. Landnutzung: **Wiese**.  
Daytime maximum of air temperature in the 2-m-level: upper sites of the Eastern Ore Mountains at March 21, clear sky conditions. Landuse: **meadow**.