

Sonderdruck aus:

# Berichte zur deutschen Landeskunde

Herausgegeben im Auftrag des

Zentralausschuß  
für deutsche Landeskunde e. V.

von

Günter Heinritz, Hans-Jürgen Klink,  
Walter Sperling und Klaus Wolf (federführend)

62. Band

Heft 2

1988

---

Selbstverlag  
des Zentralausschuß für deutsche Landeskunde e. V.  
Trier

Detlef SCHREIBER, Bochum und Wilhelm KUTTLER, Essen

## **Methodischer Ansatz zur Geländeklimatologie mit Anwendungsbeispielen aus dem glazial überformten norddeutschen Raum\***

### 1. EINLEITUNG

Bei der großklimatischen Einschätzung des norddeutschen Raumes werden diejenigen Einflußfaktoren außer acht gelassen, die einer großflächigen Betrachtungsweise entgegenstehen.

Die als Mesoklima bezeichneten Modifikationen sind räumlich begrenzte Klimateigenheiten, deren primäre Ursache in der Topographie der Landschaftsgestaltung begründet ist. Man findet sie in Tälern und an Hängen, aber auch auf ausgedehnten Wald-, Moor- und Ackerflächen sowie an stehenden oder fließenden Gewässern. Nachfolgend soll der Einfluß des glazial überprägten norddeutschen Raumes auf das Mikro- und Mesoklima einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

Die pleistozänen Ablagerungen Norddeutschlands mitsamt den holozänen Fluß- und Seemarschen, prägen ein aus recht unterschiedlichen Landschaftselementen bestehendes Gebiet, dessen morphographische Vielgestaltigkeit sich im Wechsel zwischen Marsch und Geest, zwischen Mooren und welligem Hügelland sowie flachen Niederungen zeigt. Diese Landschaftselemente und die unterschiedlich großen Meeresefernungen lassen auch bei nur geringen Höhenunterschieden ein zum Teil kleingekammertes Klimabild entstehen.

Der kleinräumige Einfluß der Reliefstrukturen auf den Witterungsverlauf wurde schon früh erkannt und zum Beispiel bereits 1928 von HEBNER anhand der mittleren Schneedeckendauer dargestellt.

\* Herrn Kollegen LIEDTKE zum 60. Geburtstag gewidmet.

Ber. z. dt. Landeskunde	Bd. 62, H. 2, 1988, S. 305—324	Trier
-------------------------	--------------------------------	-------

Detlef SCHREIBER, Bochum und Wilhelm KUTTLER, Essen

## **Methodischer Ansatz zur Geländeklimatologie mit Anwendungsbeispielen aus dem glazial überformten norddeutschen Raum\***

### 1. EINLEITUNG

Bei der großklimatischen Einschätzung des norddeutschen Raumes werden diejenigen Einflußfaktoren außer acht gelassen, die einer großflächigen Betrachtungsweise entgegenstehen.

Die als Mesoklima bezeichneten Modifikationen sind räumlich begrenzte Klimaeigenheiten, deren primäre Ursache in der Topographie der Landschaftsgestaltung begründet ist. Man findet sie in Tälern und an Hängen, aber auch auf ausgedehnten Wald-, Moor- und Ackerflächen sowie an stehenden oder fließenden Gewässern. Nachfolgend soll der Einfluß des glazial überprägten norddeutschen Raumes auf das Mikro- und Mesoklima einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

Die pleistozänen Ablagerungen Norddeutschlands mitsamt den holozänen Fluß- und Seemarschen, prägen ein aus recht unterschiedlichen Landschaftselementen bestehendes Gebiet, dessen morphographische Vielgestaltigkeit sich im Wechsel zwischen Marsch und Geest, zwischen Mooren und welligem Hügelland sowie flachen Niederungen zeigt. Diese Landschaftselemente und die unterschiedlich großen Meeresentfernungen lassen auch bei nur geringen Höhenunterschieden ein zum Teil kleingekammertes Klimabild entstehen.

Der kleinräumige Einfluß der Reliefstrukturen auf den Witterungsverlauf wurde schon früh erkannt und zum Beispiel bereits 1928 von HEBNER anhand der mittleren Schneedeckendauer dargestellt.

\* Herrn Kollegen LIEDTKE zum 60. Geburtstag gewidmet.

ziehen. ERIKSEN (1964) verweist in diesem Zusammenhang auf den südlich von Kiel gelegenen „Hornheimer Riegel“, einen quer in einer Hohlform verlaufenden, niedrigen Endmoränenzug, der deutlich eine Luv- und Leeseite der Niederschlagsverteilung erkennen läßt.

Neben dem Einfluß des Reliefs auf die Niederschlagsverhältnisse ist besonders im Bereich der kuppigen Jungmoränenlandschaft der unterschiedliche Strahlungsgenuß der Bodenoberfläche von Bedeutung für das Geländeklima.

So genießen im Winter hauptsächlich die steileren südexponierten Lagen der Endmoränenzüge eine ausgesprochene Strahlungsgunst. Im Sommer dagegen sind es die Flächen schwächer geneigter Südlagen der Moränen, die den größten Strahlungsgewinn verzeichnen. Der Unterschied zu den gleichstark geneigten Nordhängen ist im Sommerhalbjahr aufgrund der hochstehenden Sonne nur gering, nimmt aber mit zunehmender Hangneigung zu wie später noch gezeigt wird.

Im Herbst und Frühjahr sind die Bestrahlungsunterschiede zwischen einem nord- und südexponierten Moränenhang am größten.

### 3. URSTROMTÄLER

Ein zweites bedeutendes Reliefelement stellen die großen Urstromtal-Niederungen Norddeutschlands dar. Bevor jedoch geländeklimatisch relevante Aussagen getroffen werden, bedarf es einer genaueren orographisch/hydrographischen Betrachtung dieser für den norddeutschen Raum so charakteristischen Landschaftselemente.

LIEDTKE (1962, 388) definiert ein Urstromtal als „einen eiszeitlichen Abflußweg von Schmelzwässern vor dem Rande einer bestimmten Stillstandlage. Ein Urstromtal beginnt an der während des betrachteten Zeitraumes bestehenden (europäischen) Hauptwasserscheide und entwässert den gesamten dazugehörigen Sektor des Inlandeises“.

Die Urstromtal-Niederungen liegen im allgemeinen tiefer als die Altmoränenflächen. Anhand der Temperaturverhältnisse konnte zum Beispiel HENDL (1969) für den Havel-Spree-Raum eine deutliche thermische Benachteiligung dieser gefällsarmen und feuchten Talauen nachweisen. Diese für die ausgedehnten Niederungen des Untersuchungsgebietes charakteristischen wiesen- und zum Teil moorbedeckten Flächen, die im Durchschnitt 30 bis 40 m tiefer als das übrige Gelände liegen, zeichnen sich durch relativ niedrige Wintertemperaturen und durch verstärkte Frostgefährdung aus.

Tabelle 1 zeigt die hohe Zahl der Frost- und Frostwechseltage zweier in 30 bzw. 52 m Höhe über NN gelegenen Niederungsstationen gegenüber den Werten einer um 51 bzw. 29 m höher gelegenen Station.

Tab. 1: Durchschnittliche Frostdaten für die Haupttypen des Reliefs im Havel-Spree-Raum (Meßperiode „Potsdam“: 1894—1930; „Berlin-Spandau“: 1888—1914; „Krüssau“: 1910—1930) (nach HENDL 1969).

Station (m ü. NN)	Potsdam (81)	Berlin-Spandau (30)	Krüssau (52)
Erster Frost	24. 10.	15. 10.	2. 10.
Letzter Frost	19. 4.	28. 4.	16. 5.
Frosttage/Jahr	93	94	107
Frostwechseltage/Jahr	68	70	85
frostfreie Zeit (Tg.)	187	169	138

Die Ursachen dieser negativen thermoklimatischen Beeinflussung durch Urstromtäler liegen in der äußerst schlechten Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden Oberflächenmaterialien und einer vergleichsweise hohen Wärmekapazität der feuchten vermoorten Böden.

Aufgrund der geringen einstrahlungsbedingten Erwärmung tagsüber und der gegen Abend einsetzenden starken ausstrahlungsbedingten Abkühlung ist für diese Bereiche der Talniederungen nur ein vergleichsweise niedriges Temperaturniveau zu beobachten. Ausnahmen bilden die warmen Sommermonate starker Einstrahlung, während derer eine oberflächennahe Abtrocknung der Moorflächen ermöglicht und aufgrund der verminderten Wärmeleit- und -speicherfähigkeit des Substrats ein deutlich angepaßtes Temperaturniveau erreicht wird.

Des weiteren ist mit zunehmender Meeresentfernung eine verstärkte thermoklimatische Benachteiligung dieser Gebiete zu erwarten, da landeinwärts eine deutliche Abnahme der Globalstrahlung beobachtet werden kann.

So finden sich in unmittelbarer Nähe der Nordseeküste zum Beispiel die höchsten Werte der photosynthetisch aktiven Strahlung (entspricht etwa 30 Prozent der Globalstrahlung) mit  $1,65 \text{ kWh/m}^2$  der mittleren monatlichen Tagessumme im Juli, während gleichzeitig im südlichen Niedersachsen Werte um  $1,35 \text{ kWh/m}^2$  erreicht werden (HÄCKEL 1985).

#### 4. GESCHLOSSENE HOHLFORMEN

Ein charakteristisches Merkmal vornehmlich der weichseleiszeitlichen Ablagerungsgebiete, besonders der Stauchungszonen im Bereich der Eisrandlagen, bilden die zahlreichen geschlossenen Hohlformen. Diese als „Kessel“, „Sölle“ oder „Toteislöcher“ bezeichneten Landschaftselemente entstanden durch Nachsacken des Lockermaterials, das über von den Gletschern abgetrennten Eisblöcken lag, die als „Toteis“ mit in die Moränenzunge eingearbeitet worden waren.

Daneben finden sich diese Toteisformen, wenn auch nur vereinzelt, auf den weitläufigen Sänderflächen, welche als Zeugen eines kurzfristigen Vorrückens der weichseleiszeitlichen Inlandvereisung zu deuten sind.

Gegenüber dem Jungmoränengebiet sind die geschlossenen Hohlformen in der Altmoränenlandschaft durch solifluidale Massenverlagerung vollständig verfüllt, zum Teil durch Lößdecken überlagert und spielen folglich geländeklimatisch in diesen Gebieten keine Rolle.

Die klimatologische Besonderheit dieser Hohlformen tritt besonders bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen des Nachts in einer deutlichen Temperaturerniedrigung gegenüber dem Umland in Erscheinung.

Dabei können die Temperaturunterschiede bereits bei wenigen Dezimetern Höhenunterschied und je nach Böschungswinkel 1—2 K betragen (BROCKS 1939).

Die Hauptursache dieser tieferen „Muldentemperaturen“ ist in einem der Vertiefung zuströmenden Kaltluftfluß der an der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche abgekühlten Luft begründet, welcher einige Zeit nach Beginn der nächtlichen Ausstrahlung einsetzt.

Anhand von Untersuchungen über die räumliche Verteilung der Kälteseen in den Urstromtal-Niederungen bei Hamburg weist FRANKEN (1959) zusätzlich auf den Einfluß der jeweils herrschenden Wetterlagen, der Windverhältnisse sowie der Bewölkungsdichte hin.

Die vielfach mit Grund- und Oberflächenwasser gefüllten Formen dieser auf die Toteiseinlagerung zurückgehenden Landschaftselemente unterliegen der beschriebenen thermoklimatischen Benachteiligung nicht, sondern sind durch ein eigenes spezielles Mikroklima gekennzeichnet. Erwähnenswert sind die im norddeutschen Raum häufig anzutreffenden Rinnenseen, deren Entstehung zwar nicht ausschließlich durch glaziale Prozesse zu begründen ist, deren charakteristische Formen jedoch durch das stellenweise bis zu 100 m mächtige Rinnentoteis konserviert wurden. Erst das endgültige Austauen des verschütteten Toteises gab die ursprünglichen Talformen wieder frei.

## 5. SANDERFLÄCHEN

Neben den Urstromtälern und Alt- und Jungmoränengebieten prägen die Sanderflächen als weitere glaziale Landschaftsform weite Bereiche Norddeutschlands. Sie bilden das Bindeglied zwischen den kuppigen Endmoränenbereichen der ehemals inländischen Haupteisrandlage und den schmelzwassergeformten Urstromtälern.

Diese fast ebenen Flächen sind besonders in Bereichen ackerbaulicher Nutzung durch Sand- bzw. Bodenverwehungen aufgrund erhöhter Windgeschwindigkeiten und einer verstärkten oberflächennahen Austrocknung des Substrats gekennzeichnet.

Weite Teile Norddeutschlands sind durch künstlich angelegten Windschutz in Form von Wallhecken, den sogenannten „Knicks“, geprägt, die Verwehungen des Bodens und eine Schädigung der Saat verhindern soll.

Einfluß nehmen die lockeren, sandigen Böden auch auf das Klima der bodennahen Luftschicht. Aufgrund seiner extrem schlechten Leitfähigkeit gegenüber Lehm Böden erhitzt sich trockener Sandboden und die ihm aufliegende Luftschicht speziell bei Strahlungswetterlagen tagsüber sehr stark (vgl. Tab. 2). Nachts dagegen ist ein rasches Abkühlen der oberen Bodenschicht zu beobachten, da tagsüber keine Energiespeicherung stattfinden kann.

Tab. 2: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien nach GEIGER (1961) und GRÖBER (1963) aus HÄCKEL (1985, verändert)

Material	Wärmeleitfähigkeit W/m K
Lehm, naß	0,8 — 2,0
Lehm, trocken	0,08 — 0,6
Sand, naß	0,4 — 1,2
Sand, trocken	0,1 — 0,3
Moor, naß	0,3 — 0,4
Moor, trocken	0,04 — 0,12

Die Folge für diese Gebiete ist eine verstärkte Frostgefährdung, die sich — vergleichbar den Urstromtal-Niederungen — in einer hohen Zahl von Spät- und Frühfrösten sowie einer hohen Frostwechselhäufigkeit äußert.

## 6. MESO- UND MIKROKLIMATISCHE VERÄNDERUNGEN DURCH DEN NATÜRLICHEN BEWUCHS UND DIE LANDNUTZUNG

Die potentielle Vegetation Norddeutschlands bilden Waldformationen. Auf den kalkreichen Böden der Jungmoränengebiete ist die dominante Vegetationsform der Buchenwald, in den Altmoränengebieten, Sanderflächen und Urstromtal-Niederungen sind es Eichen, Hainbuchen oder Ulmen.

Im Zuge der Besiedlung durch den Menschen sind verstärkt seit dem Mittelalter durch die immer intensivere Landnahme große Teile der Waldökosysteme verdrängt worden. Weite Flächen Norddeutschlands werden heute als Wiesen- und Weideflächen oder Ackerland landwirtschaftlich genutzt. Die Folgen dieser Landnutzung sind sowohl in meso- als auch mikro-klimatischen Veränderungen spürbar.

Zum einen unterliegen die ehemals gerodeten Flächen wesentlich erhöhten Windgeschwindigkeiten und so einer Austrocknung des oberflächennahen Substrats, die großflächige Deflationen begünstigt. Zum anderen sind die den Boden erreichenden Niederschlagsmengen hauptsächlich während der Vegetationsphase größer, da die Interzeptionsleistung des Waldes fehlt. Die Folge sind unter anderem Erosionserscheinungen, besonders in den ackerbaulich genutzten Flächen der kuppigen Jungmoränengebiete.

Eine weitere Folge der überwiegend niederwüchsigen Vegetation in diesen Gebieten ist die Neigung zur Kaltluftbildung, die sich in tieferen Geländelagen ansammelt. Die Konsequenz für eine ackerbauliche Nutzung ist eine Meidung tieferer Geländelagen für frostempfindliche Kulturen, wie zum Beispiel die häufig im norddeutschen Raum anzutreffenden Obstkulturen.

## 7. EXEMPLARISCHE ABSCHÄTZUNG ZUM GELÄNDEKLIMA

Um Grunddaten zur Einschätzung der geländeklimatischen Situation für reliefiertes Gelände im eiszeitlich überformten Raum zu gewinnen, sei hier von einigen einfachen Modellvorstellungen ausgegangen, die insbesondere zur Beurteilung der direkten Einstrahlung sehr wichtig sind.

Das durch Alt- und Jungmoränen bestimmte Hügelland weist Hänge auf, für die im Falle der Jungmoränen Hangneigungen um  $15^\circ$  und im Falle der Altmoränen solche um  $10^\circ$  typisch sind. Alle Berechnungen werden für diese Hangneigungen durchgeführt. Für die Hangexpositionen werden die Haupt-himmelsrichtungen Nord, Ost, Süd und West angenommen, wobei Ost und West in den Berechnungen gleichgesetzt werden können. Größere Hangneigungen — hier angenommen  $30^\circ$  — zeigen die Ufer der tief eingeschnittenen Rinnenseen. Da sie überall etwa nord-/südgerichtet sind, soll nur für die

Ost- und die Westhänge eine Berechnung vorgenommen werden. Auch hierbei ist hinsichtlich der Einstrahlungsverhältnisse eine Gleichsetzung dieser beiden Hangexpositionen möglich.

### 7.1 Der kurzwellige Strahlungshaushalt gemäß Geländeneigung und Exposition

Zunächst wird die auf eine horizontale, ebene Fläche einfallende kurzwellige Einstrahlung  $I$  betrachtet. Ihre Intensität ist  $I = I_0 \cdot \sin h$ , wenn  $h$  die Sonnenhöhe ist. Es ist aber auch  $I = I_0 \sin (90^\circ - \varphi)$  mittags zur Zeit der Tag- und Nachtgleichen, also am Frühlingsanfang (21. 3.) und am Herbstanfang (23. 9.). Dabei ist  $\varphi$  die geographische Breite. Zur Zeit der Sommersonnenwende gilt  $I = I_0 \sin (90^\circ - \varphi + 23^\circ 30')$  (vereinfachter Ansatz — die Wendekreise liegen zur Zeit bei  $23^\circ 26'$ ) und zur Wintersonnenwende  $I = I_0 \sin (90^\circ - \varphi - 23^\circ 30')$ . Für die hier angestrebten Betrachtungen soll die geographische Breite  $\varphi$  von Potsdam ( $52^\circ 30'$ ) genommen werden. Somit ergibt sich für die Sonnenhöhe  $h$  am 21. März und am 23. September um 12 Uhr wahrer Ortszeit (WOZ)  $H = 90^\circ - 52^\circ 30' = 37^\circ 30'$  ( $\sin 37^\circ 30' = 0,61$ ), am 21. Juni  $h = 90^\circ - 52^\circ 30' + 23^\circ 30' = 61^\circ$  ( $\sin 61^\circ = 0,87$ ) und am 22. Dezember  $h = 90^\circ - 52^\circ 30' - 23^\circ 30' = 14^\circ$  ( $\sin 14^\circ = 0,24$ ). Da bei geneigten Flächen für die kurzwellige Einstrahlung  $I$  die Gradzahl der Neigung und die Exposition des Hanges zu berücksichtigen sind, muß dies noch für die Berechnung der Sonnenhöhe  $h$  herangezogen werden. Für unseren Fall der Mittagszeit gilt also bei einem  $15^\circ$  Südhang am 21. Juni  $h = 90^\circ - 52^\circ 30' + 23^\circ 30' + 15^\circ = 76^\circ$  ( $\sin 76^\circ = 0,97$ ) und für den Nordhang von  $15^\circ$  Neigung  $h = 90^\circ - 52^\circ 30' + 23^\circ 30' - 15^\circ = 46^\circ$  ( $\sin 46^\circ = 0,72$ ).

Zur Bestimmung der kurzwelligen Einstrahlung  $I$  ist nun noch die Kenntnis von  $I_0$  erforderlich. Würde man die Atmosphäre der Erde vernachlässigen, so wäre diese Größe durch die Solarkonstante gegeben ( $1.370 \text{ W/m}^2$ ). Nur etwas mehr als die Hälfte dieses Strahlungsstromes gelangt jedoch mittags bis zur Erdoberfläche. Davon ist im Mittel nur wieder eine Hälfte direkte, also gerichtete Strahlung  $I$ , die andere gestreutes Himmelslicht  $H$ . Besonders wegen der Unterschiedlichkeit der durchstrahlten Lufthülle ändern sich die Verhältnisse im Jahres- und Tagesgang bei Strahlungswetter und darüber hinaus unregelmäßig bei Wetterlagen mit Bewölkung. Die mit Strahlungsmessern zu erfassende Globalstrahlung  $S_k = I + H$  ist in erster Linie breitenabhängig und über Entfernungen wie zum Beispiel Potsdam — Hamburg hinsichtlich langjähriger Jahres- und Monatsmittelwerte kaum unterschiedlich. Da Strahlungsmesser so konstruiert sind, daß die Strahlungsabsorption optimal ist, kann die Reflexion vernachlässigt werden. Für Potsdam ( $52^\circ 30'$  n. Br.) ergab sich aus Messungen als Jahresmittel der Globalstrahlung  $S_k =$

128 W/m<sup>2</sup>, somit als Jahressumme 1121 kWh/m<sup>2</sup>. Die folgende Tabelle gibt die Monatsmittelwerte in W/m<sup>2</sup> an:

Tab. 3:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
S <sub>k</sub>	32	61	110	190	222	257	217	180	133	78	31	24

Die Aufteilung der Globalstrahlung in Sonnen- (I) und Himmelsstrahlung (H) kann nicht nach der Sonnenscheindauer vorgenommen werden, weil I immer intensiver wirkt als H. I nimmt mit der Sonnenhöhe h zu und H mit der Schichtdicke der zu durchstrahlenden Luft- und Wasserdampfhülle und folglich auch mit dem Trübungsfaktor ab. Im trüben Klima unserer Westwindzone ist H etwas größer als I und I nur im Sommer bedeutender als H, so daß man folgende prozentuale Aufteilung von S<sub>k</sub> vornehmen kann:

Tab. 4:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I/S <sub>k</sub> in %	25	30	40	50	60	60	60	50	50	40	30	20
I in W/m <sup>2</sup>	8	18	44	95	133	154	130	90	67	31	9	5
H in W/m <sup>2</sup>	24	43	66	95	89	103	87	90	66	47	21	19

Die erhaltenen Monatsmittelwerte von I und H gelten für eine horizontale Fläche. Für den nach Süden gerichteten Hang verbessern sich zum Beispiel die Einstrahlungsbedingungen für I, und es verschlechtern sich die Einstrahlungsbedingungen für H. Wenn wir annehmen, daß die Himmelsstrahlung vertikal von oben kommt, vergrößert sich bei einem um 10° geneigten Hang die zu bestrahlende Fläche im Vergleich zur Horizontalen um 1,5 Prozent. Empfängt die Horizontale eine Himmelsstrahlung von zum Beispiel H = 100 W/m<sup>2</sup>, so fällt auf den um 10° geneigten Hang nur noch H<sub>10</sub> = H/1,015 =

98,5 W/m<sup>2</sup>, auf einen um 15° geneigten Hang  $H_{15} = 96,6 \text{ W/m}^2$  und auf einem um 30° geneigten Hang  $H_{30} = 86,6 \text{ W/m}^2$ . Der Genuß der Himmelsstrahlung verringert sich damit bei den Hängen aller Richtungen um 1,5 Prozent bei 10°, um 3 Prozent bei 15° und um 13 Prozent bei 30° Neigung.

Der Südhang mit 10° Neigung erhält danach folgende Werte von I, H und  $S_k$  in W/m<sup>2</sup>:

Tab. 5:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
$I_{10S}$	9	20	47	102	143	162	139	96	73	35	10	5
$H_{10S}$	24	42	65	94	88	101	86	89	65	46	21	19
$S_{k10S}$	33	62	112	196	231	263	225	185	138	81	31	24
$S_{k10S} \cdot S_k$	1	1	2	6	9	6	8	5	5	3	0	0

Das sind fast 35 kWh/m<sup>2</sup> während der Vegetationszeit mehr als in der Ebene. Unter der Vegetationsperiode wird die Zeit vom 1. April bis 31. Oktober verstanden.

Für einen 15° geneigten Südhang ergeben sich folgende Werte in W/m<sup>2</sup>:

Tab. 6:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
$I_{15S}$	10	21	50	105	147	173	143	101	77	37	11	6
$H_{15S}$	23	42	64	92	86	99	84	87	64	45	20	18
$S_{k15S}$	33	62	114	197	233	272	227	188	141	82	31	24
$S_{k15S} \cdot S_k$	1	2	4	7	11	15	10	8	8	4	0	0

Das ergibt für die Vegetationszeit einen Gewinn von 46 kWh/m<sup>2</sup> und fast 5 Prozent mehr Energie für das ganze Jahr. Strahlungsbegünstigend kommt noch die Verkürzung der Schattenlängen dazu. Die mittägliche Schattenlänge

in der Ebene und an einem 10° bzw. 15° geneigten Süd- und Nordhang durch einen schattenwerfenden 10 m hohen Baum beträgt für die einzelnen Monate:

Tab. 7:

		Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Ebene	m	25	18	13	10	8	6	8	10	13	18	25	40
10°-Süd.	m	16	12	9	7	5	3	5	7	9	12	16	22
15°-Süd.	m	13	10	8	6	4	2	4	6	8	10	13	18
10°-Nordh.	m	47	28	19	14	11	8	11	14	19	28	47	140
15°-Nordh.	m	83	38	24	17	13	10	13	17	24	38	83	—

Beim 15°-Nordhang kommt Mitte Dezember die Sonne nicht mehr über den Horizont. Wegen der geringen Einstrahlungszeit ist im Winter die Änderung der direkten Einstrahlung  $I$  nicht besonders groß. Dagegen nimmt im Sommer die Schattenwirkung mit zunehmender Hangneigung nach Süden erheblich ab und am Nordhang erheblich zu. Die kurzwelligen Einstrahlungsverhältnisse sind für den Nordhang viel schlechter als für die Ebene. Sehr steile Nordhänge bekommen nur zwischen Frühlingsanfang und Herbstbeginn morgens und abends direkte Strahlung. Aufgrund der Himmelsstrahlung erhalten sie dennoch über den ganzen Tag auch kurzwellige Strahlung, die die Vegetation für die Photosynthese dringend benötigt, da die Absorptionsbanden des Chlorophylls im Lichtbereich des Strahlungsspektrums liegen. Wir rechnen für unsere Beispiele aber nicht mit sehr steilen Hängen, sondern — wie vereinbart — mit 10° und 15° Neigung. Dann ergibt sich die mittägliche direkte Strahlung für einen 10° geneigten Nordhang wie folgt:

$I = I_0 \sin(90^\circ - 52^\circ 30' + / - 23^\circ 30' - 10^\circ)$ . Daraus folgt:

für die Tag-Nacht-Gleichen:  $I_0 \sin(27^\circ 30') = 0,46 I_0$ ,

für die Sommersonnenwende:  $I_0 \sin(51^\circ) = 0,78 I_0$

für die Wintersonnenwende:  $I_0 \sin(4^\circ) = 0,07 I_0$ .

Für den 15° Nordhang sind die mittäglichen Sonnenhöchststände und die Strahlungsintensitäten der direkten Einstrahlung  $I$

zu den Tag-Nacht-Gleichen:  $I = I_0 \sin 22^\circ 30' = 0,38 I_0$ ,

zur Sommersonnenwende:  $I = I_0 \sin 51^\circ = 0,78 I_0$  und

zur Wintersonnenwende:  $I = I_0 \sin(-1^\circ)$ .

Im letzten Fall kommt die Sonne nicht mehr über den Horizont und der

Nordhang bekommt keine direkte Strahlung mehr. Das gilt nur für die Zeit vom 18. bis 26. Dezember.

Die folgende Tabelle gibt die Werte der direkten Einstrahlung, der Himmelsstrahlung und der Globalstrahlung für einen 10° geneigten Nordhang in Norddeutschland in W/m<sup>2</sup> wieder.

Tab. 8:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I <sub>10N</sub>	3	11	29	72	109	133	107	68	45	19	4	1
H <sub>10N</sub>	24	42	65	94	88	101	86	89	65	46	21	19
S <sub>k10N</sub>	27	53	94	166	197	234	193	157	111	65	25	20
S <sub>k10N</sub> -S <sub>k</sub>	-5	-8	-16	-24	-25	-23	-24	-23	-23	-13	-6	-4

Für einen 15° geneigten Nordhang betragen die Werte:

Tab. 9:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I <sub>15N</sub>	2	8	24	62	100	124	97	59	37	14	2	0
H <sub>15N</sub>	23	42	64	92	86	99	84	87	64	45	20	18
S <sub>k15N</sub>	25	50	88	154	186	223	181	146	101	59	22	18
S <sub>k15N</sub> -S <sub>k</sub>	-7	-11	-22	-36	-36	-34	-36	-34	-32	-19	-9	-6

Während der Vegetationsperiode erhält der 10° Nordhang 112 kWh/m<sup>2</sup> weniger kurzwellige Strahlung und der 15° Nordhang sogar 162 kWh/m<sup>2</sup>. Das sind etwa 10 bzw. 15 Prozent Strahlungsverlust gegenüber der Ebene. Die kurzwelligeren Strahlungsverhältnisse der nach Osten bzw. nach Westen exponierten steilen Hänge bei Rinnenseen mit angenommenen 30° Hangneigung sollen nun analysiert werden. Dafür ergeben sich folgende Werte in W/m<sup>2</sup>:

Tab. 10:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I <sub>30EW</sub>	7	17	40	87	120	138	116	82	61	30	9	4
H <sub>30EW</sub>	21	37	57	82	77	89	75	78	57	41	18	16
S <sub>k30EW</sub>	28	54	97	169	197	227	191	160	118	71	27	20
S <sub>k30EW</sub> -S <sub>k</sub>	-4	-7	-13	-21	-25	-30	-26	-20	-15	-7	-4	-4

Für die mit 15° Hangneigung angenommenen Ost- und Westhänge von Jungmoränen ergeben sich folgende Werte in W/m<sup>2</sup>:

Tab. 11:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I <sub>15EW</sub>	8	17	42	90	127	146	123	86	64	30	9	4
H <sub>15EW</sub>	23	42	64	92	86	99	84	87	64	45	20	18
S <sub>k15EW</sub>	31	59	105	182	213	245	207	173	128	75	29	22
S <sub>k15EW</sub> -S <sub>k</sub>	-1	-2	-4	-8	-9	-12	-10	-7	-5	-3	-2	-2

Um 10° geneigte West- bzw. Osthänge erhalten:

Tab. 12:

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I <sub>10EW</sub>	8	18	43	92	129	149	126	88	65	31	9	4
H <sub>10EW</sub>	24	42	65	94	88	101	86	89	65	46	21	19
S <sub>k10EW</sub>	32	60	108	186	217	250	212	177	130	77	30	23
S <sub>k10EW</sub> -S <sub>k</sub>	-0	-1	-2	-4	-5	-7	-5	-3	-3	-1	-1	-1

Für die Vegetationsperiode ergeben sich für die Ost- bzw. Westhänge damit gegenüber der Ebene folgende Strahlungsverluste:

30° Hang: 95 kWh/m<sup>2</sup>,

15° Hang: 37 kWh/m<sup>2</sup>,

und

10° Hang: 20 kWh/m<sup>2</sup>.

## 7.2 Die Strahlungsbilanzen gemäß Geländeneigung und Exposition

Nach Betrachtung der Globalstrahlung sollen nun mit Hilfe von Strahlungsbilanz- und Temperaturmeßwerten in Potsdam und Hamburg Strahlungsbilanzen abgeschätzt werden. Als mittlere Lufttemperatur der Vegetationszeit wird das Mittel des Zeitraumes vom 1. April bis zum 31. Oktober verwendet. Das ist für Potsdam 13,2° C. Die Änderung der mittleren Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Hangneigung und der Hangexposition kann nach der besonders temperaturwirksamen direkten Sonnenstrahlung I abgeschätzt werden. Es wird angenommen, daß eine Zunahme oder Abnahme der insgesamt während der Vegetationszeit eingestrahlteten direkten Sonnenstrahlung I um 11,6 kWh/m<sup>2</sup> einer Änderung des Temperaturmittels für den gleichen Zeitraum von 0,1 K entspricht.

Weitere Voraussetzungen für die Berechnung der Strahlungsbilanzen sind: Es wird angenommen, daß H senkrecht von oben einstrahlt. Deshalb muß, wie beschrieben, wegen der Flächenvergrößerung durch Hängigkeit bei 10° Neigung um 1,5 Prozent, bei 15° Neigung um 3 Prozent und bei 30° um 13 Prozent reduziert werden. Für die Reflexion  $R_{I,H}$  werden grundsätzlich 15 Prozent der Globalstrahlung und für die langwellige Ausstrahlung grundsätzlich  $E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 0,96 \cdot \sigma \cdot T^4$  angesetzt. Bei der Gegenstrahlung der Atmosphäre wird angenommen, daß auch diese senkrecht von oben eintrifft. Dann muß wegen der Flächenvergrößerung durch Hängigkeit der Betrag ebenfalls reduziert werden. Das ergibt bei 10° Neigung 1,5 Prozent, bei 15° Neigung 3 Prozent und bei 30° Neigung 13 Prozent. Die Ausstrahlung wird durch Horizonteinengung gemindert. Das ergibt beim 10°-Hang — 3,5 Prozent, beim 15°-Hang — 5,5 Prozent und beim 30°-Hang — 13 Prozent.

Bei Berücksichtigung aller genannten Annahmen ergeben sich die Strahlungsbilanzen der Ebene und der verschiedenen Hänge für die Vegetationsperiode in kWh/m<sup>2</sup> zu:

Tab. 13:

t° C	Gelände	I	+	H	—	R <sub>I+H</sub>	—	A	+	G	=	S
13,2	Ebene	515	+	423	—	141	—	3259	+	2770	=	308
13,5	10°-Südhang	549	+	417	—	140	—	3158	+	2742	=	410
13,7	15°-Südhang	575	+	408	—	144	—	3102	+	2688	=	425
12,4	10°-E/W-Hang	428	+	417	—	127	—	3110	+	2742	=	350
12,6	15°-E/W-Hang	451	+	408	—	129	—	3054	+	2690	=	366
12,8	30°-E/W-Hang	465	+	366	—	125	—	2819	+	2466	=	363
12,3	10°-Nordhang	406	+	417	—	124	—	3105	+	2742	=	336
11,9	15°-Nordhang	362	+	408	—	116	—	3024	+	2688	=	318

Das Ergebnis, daß die Strahlungsbilanz hängigen Geländes grundsätzlich größer ist als die der Ebene, ist auf den ersten Blick überraschend, wird aber erklärlich, wenn man einmal die kurzwellige der langwelligen Strahlungsbilanz für eine Vegetationsperiode gegenüberstellt (alle Angaben in kWh/m<sup>2</sup>):

Tab. 14:

Gelände	S <sub>k</sub>	—	S <sub>L</sub>	=	S
Ebene	797	—	489	=	308
10°-Südhang	826	—	416	=	410
15°-Südhang	839	—	414	=	425
10°-E-/W-Hang	718	—	368	=	350
15°-E-/W-Hang	730	—	364	=	366
30°-E-/W-Hang	706	—	353	=	353
10°-Nordhang	699	—	363	=	336
15°-Nordhang	654	—	336	=	318

Die sonnenzeitlich zur Verfügung stehende kurzwellige Strahlung, die wegen der Stomatafunktionen der Pflanzen von entscheidender Bedeutung für die Photosynthese wie für die Transpiration ist, verändert sich mit der Hang-

neigung und vor allem mit der Hangexposition. So zeigt die Globalstrahlung das Erwartungsgemäße. Bei der langwelligen Strahlung, die ganztägig herrscht, macht sich die Horizonteinengung bereits bei geringer Neigung in einer effektiven Ausstrahlungsminderung deutlich bemerkbar. Nur so entstehen die Erhöhungen der Strahlungsbilanzen bei reliefierter Landschaft. Auch bei der Erklärung des „warmen Hangklimas“ ist das nicht zu vernachlässigen.

### 7.3 Der Energiehaushalt gemäß Geländeneigung und Exposition

Nun lohnt es sich, Überlegungen zur Wärmebilanz anzustellen. Man setzt an: Strahlungsbilanz  $S = \text{Evapotranspiration } ET + \text{Bodenerwärmung } B + \text{Lufterwärmung } L$ . Hier sollen  $B$  und  $L$  nicht getrennt behandelt werden. Die meiste Energie wird bei Vorhandensein von Wasser sowieso immer zur Verdunstung bzw. Evapotranspiration benutzt. Bei der Umrechnung auf Niederschlagshöhen soll davon ausgegangen werden, daß innerhalb der Vegetationszeit als Niederschlag nur Regen fällt und daß das zu verdunstende Wasser  $+ 10^\circ \text{C}$  warm ist und deswegen pro Gramm Wasser nur  $0,688 \text{ Wh}$  Verdunstungsenergie benötigt werden.

Je hängiger das Gelände ist, umso schneller läuft Wasser nach Regenperioden ab und umso kürzere Zeit bleiben die Böden naß. Beim Südhang kommt hinzu, daß der Regen, auf wärmere Oberflächen treffend, in stärkerem Maße ohne zu versickern rasch verdunstet. Auch das begünstigt Trockenperioden und benachteiligt die Feuchteperioden im Jahr für Böden und Flora.

Die folgende Tabelle gibt die prozentuale Aufteilung der von der Strahlungsbilanz  $S$  während der Vegetationsperiode zur Verfügung gestellten Energie auf die Evapotranspiration  $ET$  sowie auf die Boden- und Lufterwärmung  $B + L$  wieder. Sie zeigt die sich daraus ergebenden Wärmebilanzen der Ebene sowie verschiedener Geländeneigungen und -expositionen in  $\text{kWh/m}^2$  sowie die entsprechende Evapotranspiration in  $\text{mm}$ :

Tab. 15:

Gelände	S	=	ET	+	L + B	ET
Ebene	308	=	246	+	62	358 mm
			80 % S		20 % S	
10°-Südhang	410	=	287	+	123	417 mm
			70 % S		30 % S	

15°-Südhang	425	=	276	+	149	401 mm
			65 % S		35 % S	
10°-E-/W-Hang	350	=	263	+	87	382 mm
			75 % S		25 % S	
15°-E-/W-Hang	366	=	256	+	110	372 mm
			70 % S		30 % S	
30°-E-/W-Hang	353	=	230	+	123	334 mm
			65 % S		35 % S	
10°-Nordhang	336	=	269	+	67	391 mm
			80 % S		20 % S	
15°-Nordhang	318	=	239	+	79	347 mm
			75 % S		25 % S	

Danach lassen sich nun auch Wasserbilanzen rechnen. Hierbei sollen die Niederschläge von Potsdam (P), Lüneburg (L) und Neumünster (N) zugrunde gelegt werden. Auch dabei wird angenommen, daß der Regen im Mittel senkrecht von oben kommt und daher das geneigte Gelände wieder mit den Abzügen von 1,5 Prozent, 3 bzw. 13 Prozent bedacht werden muß.

Tab. 16: Wasserbilanzen in mm pro Vegetationszeit

		N	—	ET	=	WB
Ebene	P	382	—	358	=	+ 24
	L	386	—	358	=	+ 28
	N	470	—	358	=	+ 112
10°-Südhang	P	376	—	417	=	— 41
	L	380	—	417	=	— 37
	N	463	—	417	=	+ 46
15°-Südhang	P	369	—	401	=	— 32
	L	373	—	401	=	— 28
	N	454	—	401	=	+ 53
10°-E-/W-Hang	P	376	—	382	=	— 6
	L	380	—	382	=	— 2
	N	463	—	382	=	+ 81

15°-E-/W-Hang	P	369	—	372	=	—	3
	L	373	—	372	=	+	1
	N	454	—	372	=	+	82
30°-E-/W-Hang	P	331	—	334	=	—	3
	L	334	—	334	=		0
	N	407	—	334	=	+	73
10°-Nordhang	P	376	—	391	=	—	15
	L	380	—	391	=	—	11
	N	463	—	391	=	+	72
15°-Nordhang	P	369	—	347	=	+	22
	L	373	—	347	=	+	26
	N	454	—	347	=	+	107

WB = Wasserbilanz

Nur Neumünster zeigt immer positive Wasserbilanzen, während in Brandenburg und in der Lüneburger Heide auch leicht negative Bilanzen über die Vegetationszeit auftreten, sobald das Gelände nicht mehr eben ist. Man darf aber nicht vergessen, daß sich in humiden winterkühlen Klimaten während des Winters der Boden mit Wasser sättigt, also die volle Feldkapazität für den Vegetationsstart im Frühling zur Verfügung steht. Das sind je nach Bodenart im obersten Meter des Bodens zwischen 100 und 200 mm pflanzenverfügbares Wasser. Die speicherbare Wassermenge nimmt dabei in der Reihung Sand — lehmiger Sand — sandiger Lehm — Lehm — Löß zu.

#### 7.4 Schlußbetrachtung

Bei den angenommenen Hängigkeiten kann man hinsichtlich der Landnutzung nur von Grünlandnutzung und Forstwirtschaft ausgehen, weil in der modernen Landwirtschaft bei Geländeneigungen über 6° kaum noch geackert wird. Die von den Eis- und Zwischeneiszeiten hinterlassenen Moränen, Sanderflächen und Lößbörden haben in Norddeutschland fast ausschließlich tiefgründig durchwurzelbare Böden, so daß heute die Wälder meist Reinkulturen von Kiefer oder Buche sind. Wegen der geringeren Interzeption wird die Kiefer dort die geeigneteren Standorte haben, wo die Böden leicht sind und wenig Niederschlag fällt (Brandenburg, Lüneburger Heide), während die Buche eher auf Lehmböden bei reichlicherer Niederschlagsversorgung (z. B. Schleswig-

Holstein) stockt. Die Beschattung wurde nur angedeutet und bei der Bilanzierung nicht mitberücksichtigt. Sie würde bei der direkten Sonnenstrahlung den Gegensatz Nordhang — Südhang verschärfen, die Wasserbilanz abschwächen, so daß besonders der Nordhang an Humidität gewinnt. Er hat die ergiebigeren Quellschüttungen.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Nach einer Beschreibung typischer in Norddeutschland vorkommender Beispiele des glazialen Formenschatzes und deren Wirkung auf das Geländeklima (Moränen, Urstromtäler, geschlossene Hohlformen, Sanderflächen) wird in Kurzform etwas zu meso- und mikroklimatischen Veränderungen durch den natürlichen Bewuchs und die Landnutzung gesagt. Danach wird exemplarisch mit unterschiedlicher Hangneigung bei Exposition nach den vier Haupthimmelsrichtungen abgeschätzt, wie sich bei der Hängigkeit, Strahlungsbilanz, Wärmebilanz und Wasserhaushalt im norddeutschen glazial überformten Gebiet ändern könnten. Dabei ist besonders an Jungmoränen, Altmoränen und an die steilen Hänge der Rinnenseen gedacht.

## LITERATUR

- BROCKS, K. 1939: Nächtliche Temperaturminima in Furchen mit verschiedenen Böschungswinkeln. In: Meteorol. Zeitschrift, 56.
- DWD (= Deutscher Wetterdienst. Hrsg.) 1964: Klima-Atlas von Niedersachsen. Offenbach/M.
- DWD (= Deutscher Wetterdienst. Hrsg.) 1967: Klima-Atlas von Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen. Offenbach/M.
- ERIKSEN, W. 1964: Beiträge zum Stadtklima von Kiel. In: Schriften des Geographischen Instituts der Universität Kiel. Bd. 22. H. 1. Kiel.
- FRANKEN, E. 1959: Über eine Abhängigkeit der Temperaturverteilung in Strahlungs Nächten von Geländeformung und Windrichtung. In: Met. Rundschau, 12.
- HÄCKEL, H. 1985: Meteorologie. Stuttgart.
- HEBNER, E. 1928: Die Dauer der Schneedecke in Deutschland. In: Forschungen zur deutschen Landes- und Volkskunde. Bd. 16. H. 2. Stuttgart.
- HENDL, M. 1969: Grundzüge des Klimas im Havel-Spree-Raum zwischen Nördlichem und Südlichem Landrücken. In: Wiss. Abhandlungen der Geogr. Gesellschaft der DDR. Bd. 10. Berlin.
- KARTE, J. 1979: Räumliche Abgrenzung und regionale Differenzierung des Periglaziärs. Bochumer Geographische Arbeiten H. 35.
- LIEDTKE, H. 1962: Glaziale Urstromtäler und Eisrandlagen am Südrand der nordischen Vereisung. In: Verhandlungen des Deutschen Geographentages. Bd. 33, S. 385—390.