

Zur Frage der Orientierung nordalaskischer Seen mit Hilfe des Satellitenbildes

Von Werner Fürbringer und Rupert Haydn *

Zusammenfassung: Auf der Grundlage eines ERTS-1 Bildes (multispektrale Scanner Aufnahme) von der Küstenebene Nordalaskas wurde die Größe und die Orientierung von ca. 520 Tausen eingemessen, um von der statistischen Verteilung dieser Parameter die Frage der Orientierung der Seen her zu untersuchen. Die statistische Auswertung des Datenmaterials indiziert, daß eine deutliche Korrelation zwischen Orientierung und Größe der größeren Seen sowie zwischen Orientierung und dominierenden Lineamentrichtungen der kleineren Seen besteht. Ein zusätzlicher Vergleich dieser Parameter mit der vorherrschenden Windrichtung zeigt, daß nur die Orientierung der größeren Wasserkörper in starkem Maße von der vorherrschenden Windrichtung bestimmt wird. Die Orientierung der kleineren Seen hängt dagegen deutlich von den morphologisch-strukturellen Gegebenheiten ab.

Summary: On the basis of an ERTS-1 image (multispectral scanner) covering the coastal plain of Northern Alaska, the size and orientation of about 520 thaw lakes were measured. The statistical evaluation of these data indicates that there is an evident correlation not only between the orientation and the size of larger water bodies but also between the orientation and the prevailing lineations which is restricted to the smaller lakes.

Further comparative studies of these parameters with the dominant wind direction indicate that only the orientation of larger water bodies is strongly related to it. The orientation of the smaller water bodies, however, is evidently controlled by morphological and structural features.

Einleitung und Problemstellung

Aus der arktischen Küstenebene Nordalaskas sind erstmals von Black und Barksdale (1949) Seen beschrieben worden, deren Längsachsen auffällig in NNW/SSE-Richtung orientiert sind. Bei einigen Seen beobachteten sie auch einen mehr östlichen Orientierungstrend, doch schien dieser nirgends auch nur annähernd so ausgeprägt zu sein wie der NNW/SSE-Trend (Black and Barksdale, 1949, S. 110).

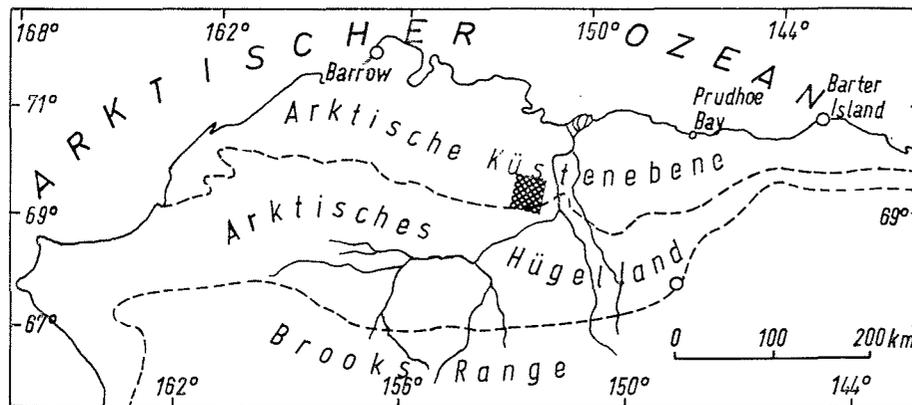


Abb. 1: Arktische Abdachung (nach Walker and Arnborg, 1965) mit ERTS-Bildausschnitt (gerastert).
Fig. 1: Arctic slope (after Walker and Arnborg, 1965) showing location of study area (shaded).

Die Orientierung der Seen erfolgte nach Black und Barksdale längs ehemals aus nord-nordwestlichen bis süd-südöstlichen Richtungen wehender Winde (1949, S. 117). Diese Theorie ist jedoch von keinem der nachfolgenden Autoren, die sich ebenfalls mit dem Problem der Orientierung dieser Seen befaßten, akzeptiert worden. Zwar wird dem Windeinfluß auch in den meisten anderen Theorien eine ausschlaggebende Rolle zugestanden, doch das Ergebnis ist ein anderes (Deevey, 1953; Livingstone, 1954; Rex, 1961;

* Dr. Werner Fürbringer, Geographisches Institut der Universität, 8 München 2, Luisenstraße 37.

Dr. Rupert Haydn, Zentralstelle für Geo-Photogrammetrie und Fernerkundung, 8 München 2, Luisenstraße 37.

Carson and Hussey, 1962). Andere Theorien wiederum lassen den Faktor Wind gänzlich außer Betracht (Rosenfeld and Hussey, 1958; Carlson et al., 1959).

Nach Washburn (1973) gilt derzeit die Theorie von Carson and Hussey (1962) als die wahrscheinlichste, nicht zuletzt wohl deshalb, weil sie auf durchgeführten Messungen beruht. In den Überlegungen von Carson und Hussey kommt zum Ausdruck, daß eine Orientierung nicht längs ehemaliger NNW/SSE-Winde, sondern quer zu den heutigen vorherrschenden ENE-Winden erfolgt. Nach dieser Auffassung kommt es in Windrichtung zur Entstehung von Sandbänken an den leeseitigen Seeufern, die eine Wellenerosion und damit eine Vergrößerung der Seen in Windrichtung weitgehend unterbinden und eine verstärkte Seitenerosion senkrecht zur Windrichtung zur Folge haben. Die abgebildete multispektrale Scanner-Aufnahme des amerikanischen Erdbeobachtungssatelliten ERTS-1 (Spektralbereich: 0,4—0,6 μ ; 0,8—1,1 μ) zeigt einen etwa 35.200 km² großen Ausschnitt der arktischen Küstenebene. Bedingt durch die Synopsis dieser Aufnahme ist die bekannte NNW/SSE-Orientierung eines Großteils der dunkel erscheinenden Seen deutlich erkennbar (vgl. Abb. 2, A).

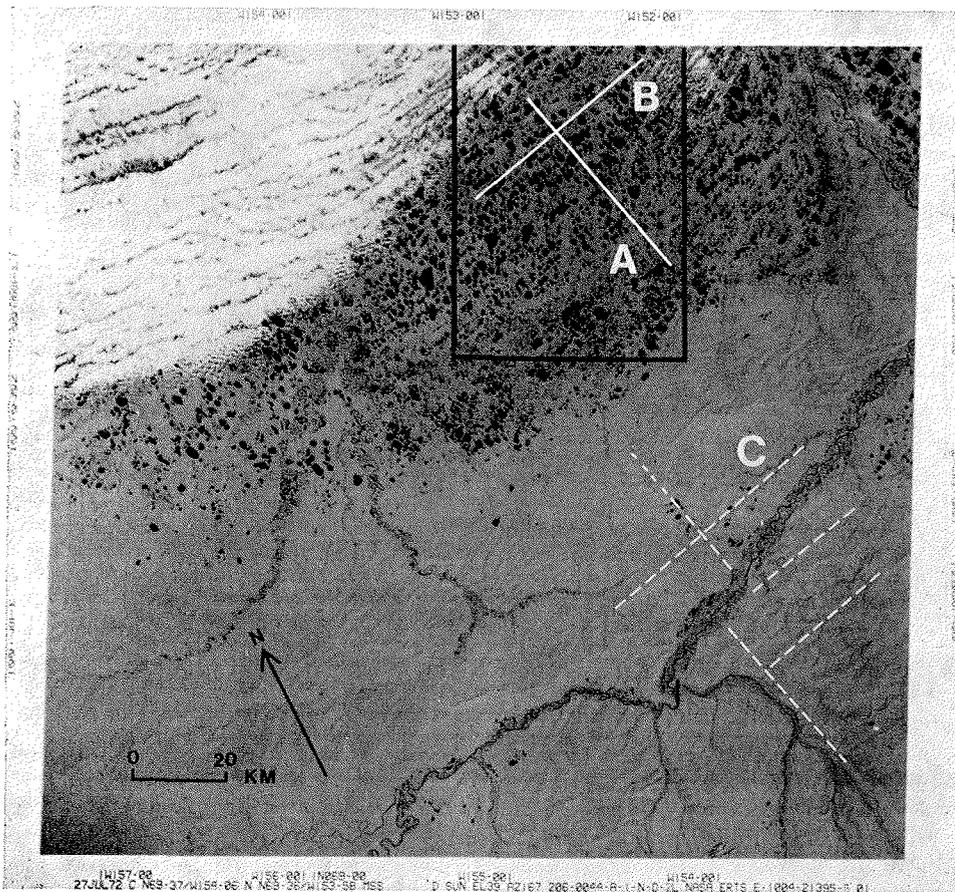


Abb. 2: ERTS-1 Multispektralaufnahme eines Teils der arktischen Abdachung Nordalaskas. Höhe: ca. 900 km, Datum: 27. Juli 1972. Der untersuchte Bildausschnitt erscheint schwarz umrandet. A und B: Indizieren vorherrschende Orientierungstrends in NNW/SSE und ENE/WSW Richtung. C: Indiziert tektonische Lineationen parallel zu den Orientierungstrends.

Fig. 2: ERTS-1 multispectral image of part of the Arctic slope, northern Alaska. Height: about 900 km, date: July 27, 1972. Frame indicates study area. A and B: indicate dominant orientation trends of the lakes in the NNW/SSE and ENE/WSW directions. C: indicates tectonic lineations parallel to the orientation trends.

Darüber hinaus zeigt die Satellitenbilddaufnahme aber auch einen sehr deutlichen Orientierungstrend in ENE/WSW-Richtung, der in den bisherigen Orientierungstheorien nicht berücksichtigt ist und anscheinend in dieser ausgeprägten Form bisher unbekannt war (vgl. Abb. 2, B). Auch auf den vorhandenen topographischen Kartenblättern vergleichbaren Maßstabs kommt der ENE/WSW-Trend in dieser Form nicht zum Ausdruck. Gleichsinnig zum NNW/SSE- und ENE/WSW-Trend verlaufen im südlichen Bildausschnitt deutlich sichtbare Photolineamente (vgl. Abb. 2, C).

Das Satellitenbild liefert hier eine Neuinformation und darüber hinaus eine optimale Voraussetzung, die Frage der Orientierung der Seen einmal ausgehend von der statistischen Verteilung der Parameter: Länge und Richtung der Längsachsen zu untersuchen. Bevor auf diese Untersuchung näher eingegangen wird, soll der Landschaftstyp des Bildausschnitts in seiner physiographischen Eigenart vorgestellt werden.

Physiographie des Bildausschnitts

Die arktische Küstenebene (Gesamtfläche ca. 60.500 km²) ist die nördlichste der drei großen physiographischen Regionen Nordalaskas. Sie grenzt im N an das Eismeer (Abb. 1).

Topographie und Geologie: Die Topographie dieser Landschaft weist relative Höhenunterschiede in der Größenordnung von maximal einigen Zehnern von Metern auf. Die monotone Ebenheit erklärt sich aus den flachliegenden, sandigen und siltigen Sedimenten der quartären Gubik-Formation, die die Küstenebene in einer Mächtigkeit bis zu einigen Zehnern von Metern überlagern. Unterlagert wird sie von teils marinen Kreideablagerungen — wie hier im Bildausschnitt —, teils von tertiären Sedimenten. Das Gebiet war selbst zur Zeit der maximalen pleistozänen Vereisung nicht eisbedeckt. Die aus der weiter südlich gelegenen Brooks-Range nach N austretenden Gletscher endeten am Mittellauf des Colville River.

Klima: Dem Temperatur- und Niederschlagsregime nach ist das Klima ein subarktisches Tundrenklima (ET-Klima nach Köppen). Kurze, maximal drei Monate dauernde, kühle Sommer und entsprechend lange, kalte Winter sind kennzeichnend. Barrow, die dem Bildausschnitt am nächsten gelegene Klimastation, hat eine Jahresdurchschnittstemperatur von $-12,8^{\circ}\text{C}$. Das Julimittel dieser Station liegt bei $4,4^{\circ}\text{C}$; das Februarmittel bei $-29,4^{\circ}\text{C}$. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge liegen bei 107 mm (Station Barrow). Kontinuierliche Schneebedeckung herrscht während der Monate September bis Mai (durchschnittliche Schneehöhe: einige Dezimeter). Während der arktischen Sommermonate ist die Tundrenoberfläche schnee- und eisfrei. Der Wind weht — wie das Richtungsdiagramm zeigt (Abb. 3) — vorzugsweise aus ENE.

Vegetation: Die gesamte Küstenebene wird von einer baumlosen Tundrenmatte überdeckt. Der Verlauf der 10°C -Isotherme des wärmsten Monats, des Juli, südlich der Brooks-Range erklärt das Fehlen von Baumwuchs. An manchen geschützten Flußuferböschungen sind zwergwüchsige Weiden entwickelt. Ansonsten sind als Charakterpflanzen der Tundra verschiedene Sphagnum-Arten sowie Flechten und Gräser (vor allem *Carex aquatilis*) vertreten.

Dauerfrost (Permafrost): Man versteht darunter jenen Teil der Lithosphäre, dessen Temperatur dauernd oder mindestens seit zwei Jahren unter 0°C liegt. Nordalaska in seiner Gesamtheit liegt im Einflußbereich des Dauerfrostes. Bohrungen nach wird er bis zu mehreren hundert Metern mächtig (z. B. bei Prohoe Bay: 609 m). Bei Barrow liegt die kalkulierte Mächtigkeit bei 405 m. Die Obergrenze des Dauerfrostes liegt im Durchschnitt einige Dezimeter unter der Oberfläche. Abweichungen vom Durchschnittswert sind von lokalen Vegetations-, Boden- und hydrologischen Verhältnissen abhängig. Unter

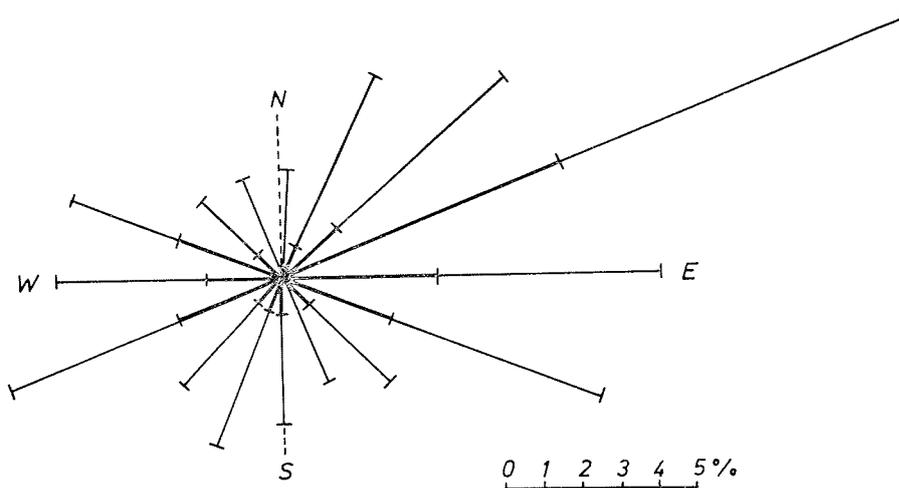


Abb. 3: Richtung, Richtungshäufigkeit und Geschwindigkeit der Winde bei Barrow, Alaska. Die Vektorlänge ist ein Maß für die Häufigkeit einer bestimmten Windrichtung in %. Die stärker gezogene Linie indiziert Windgeschwindigkeiten über 15 m.p.h., die schwächer gezogene Linie Geschwindigkeiten unter 15 p.m.h. (nach Black and Barksdale, 1949, S. 109).

Fig. 3: Direction, velocity, and frequency of winds at Barrow, Alaska. Length of vector indicates percentage of time of wind blowing in indicated direction. Heavy line indicates wind velocities greater than 15 m/h, light line the of less than 15 m/h (after Black and Barksdale, 1949, p. 109).

seichten Seen (bis zu 2 m) wurde ein bogiges Abtauchen der Permafrostobergrenze in der Größenordnung von einigen Metern festgestellt, bei tieferen Seen und Flüssen (Wassertiefe: 10 m und mehr) dagegen soll der Permafrost gänzlich aussetzen. Die über der Permafrostobergrenze liegende, im Mittel 0,5 m mächtige Schicht (aktive Schicht) taut im Sommer jeweils auf. Eine Drainage des dann anfallenden Schmelzwassers von Bodeneis der aktiven Schicht ist infolge des gefrorenen Untergrundes nicht möglich. So können sich ausgedehnte Versumpfungen und Vernässungen bilden und halten. Die Tundra bildet so im Sommer einen kaum passierbaren Sumpf.

Orientierte Seen

Verbreitung und Entstehung: An die Verbreitung von Dauerfrost gebunden sind die im Bildausschnitt erkennbaren orientierten Seen. Sie sind in der nördlichen Küstenebene stärker konzentriert als in der südlichen. Ihre Größe reicht von kleinen wassererfüllten Polygonvertiefungen von nur wenigen Metern Durchmesser bis zu Seen von mehreren Kilometern Durchmesser. Die Umrißformen der Seen sind sehr unterschiedlich strukturiert: Längliche, ovale, quadratisch-rechteckige und unregelmäßige Formen kommen vor. Die Wassertiefen betragen im Durchschnitt nur wenige Meter. Wegen der geringen Wassertiefe sind die Seen im wesentlichen thermisch nicht geschichtet. Die Wassertemperaturen erreichen in durchschnittlich warmen Sommern Werte bis zu 12°C (Brewer, 1958, S. 280).

Die im Bildausschnitt erkennbaren Seen sind durchweg sog. Tauseen, deren Entstehung Kronberg (1961, S. 22) folgendermaßen skizziert: „Tauseen entstehen in ebenen Bereichen der Zone ständigen Permafrostes, wenn die obersten Meter des Bodenprofils aus feinklastischen Sedimenten und Torf aufgebaut sind. Oft ist den gefrorenen Sedimenten massig oder linsenförmig Eis eingeschaltet. Schmilzt das Eis durch sommerliches Tauen

oder Klimaschwankungen, so übersteigt die anfallende Schmelzwassermenge bei weitem die der Porosität der Sedimente entsprechende Aufnahmefähigkeit für Wasser. Über den sich setzenden Sedimenten entsteht eine flache Mulde als Beginn des sich entwickelnden Tausees."

Sind diese Schmelzhohlformen einmal geschaffen, unterliegen sie einem bestimmten Zyklus. Im Sommer jeweils schmilzt das Wasser dieser Hohlformen das angrenzende gefrorene Ufermaterial, so daß dieses nachstürzt und sich auf diese Weise die Seen vergrößern. Die Expansionsraten solcher aktiver Tauseen können zwischen 30 cm/Jahr (Tedrow, 1969) und etwa 1 m/Jahr (Wahrhaftig, 1965) betragen; nach Beobachtungen von Black (1969) können es während eines einzigen Sturmes sogar mehrere Meter sein.

Die Vergrößerung dieser Seen erfolgt aber nicht unbegrenzt. Spätestens dann, wenn die zurückweichenden Uferwände solcher aktiver Tauseen von topographisch niedriger gelegenen Seen oder Flußtälern gekappt werden, fließen sie dorthin ab, laufen also ganz oder teilweise aus. Häufig wird in den ausgelaufenen Seen ein neuer Zyklus initiiert, z. B. durch Neuentstehung eines Tausees oder Übergreifen eines anderen Tausees aus der Nachbarschaft.

Auswertung und Ergebnisse

Die eigentliche Bearbeitung beschränkte sich auf ein Gebiet von ca. 300 km² (Abb. 2) im Bereich der Tauseen.

Die Auswertung wurde mit Hilfe eines photogrammetrischen Gerätes (ZEISS Planimat und Ecomat Registrieranlage) vorgenommen, um bei einer entsprechenden Vergrößerung die xy-Koordination der Längsachsen auch der kleinen Seen exakt erfassen zu können. Auf diese Weise konnten Wasserflächen mit einer minimalen Ausdehnung von 200 m eingemessen werden.

Die Berechnung von Richtung und Länge der Achsen aus den automatisch gewonnenen xy-Koordinaten wurde mit einem FORTRAN-IV-Programm durchgeführt (J. Nithack, 1974).

Das auf diese Weise gewonnene Datenmaterial wurde hinsichtlich des Parameters Achsenlänge in 4 Klassen, die sich wie folgt zusammensetzen, untergliedert:

Klasse 1: Achsenlänge < 1.000 m

Klasse 2: Achsenlänge 1.000—2.000 m

Klasse 3: Achsenlänge 2.000—3.000 m

Klasse 4: Achsenlänge > 3.000 m

Die Darstellung der prozentualen Richtungsverteilung aller Seen (Abb. 4) weist ein deutliches Maximum mit 42% bei 165° auf. Dieses Orientierungsmaximum entspricht der bekannten von verschiedenen Autoren diskutierten NNW-SSO-Richtung. Untergeordnet tritt ein Nebenmaximum (7,4% bei 65°) auf, das nach ENE-WSW weist.

Der Vergleich dieser Darstellung mit der in Abb. 3 wiedergegebenen Windrose verdeutlicht, daß die Mehrzahl der Tauseen eine Orientierung einnehmen, die etwa senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung aus ENE verläuft. Dieser Zusammenhang entspricht der von Carson und Hussey (1962) vertretenen Theorie der Orientierungsentstehung.

Der untergeordnet auftretende Orientierungstrend (65°) läßt sich jedoch auf der Grundlage des vorherrschenden ENE-Windes schwer erklären.

In einem nächsten Auswerteschritt wurde nun versucht, etwaige Abhängigkeiten zwischen der Orientierungshäufigkeit und der Größe der Seen herauszustellen. Die in der Abb. 5 dargestellten Kurven entsprechen den oben beschriebenen 4 Größenklassen der Seen.

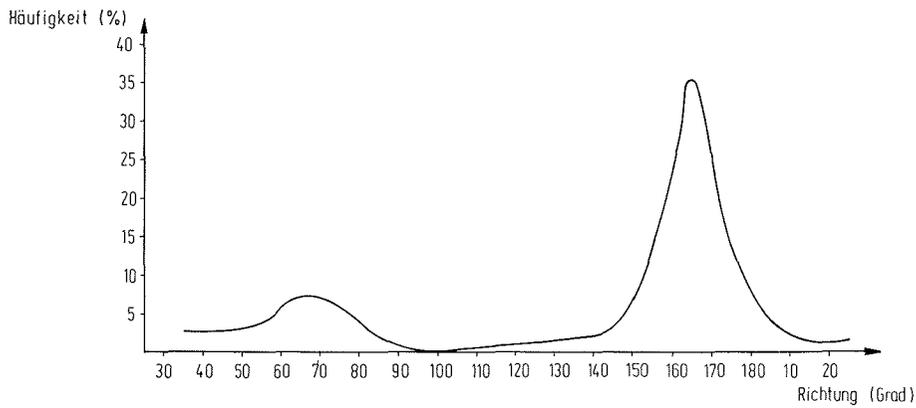


Abb. 4: Orientierung der Seen im Untersuchungsgebiet.
 Fig. 4: Orientation of lakes in the study area.

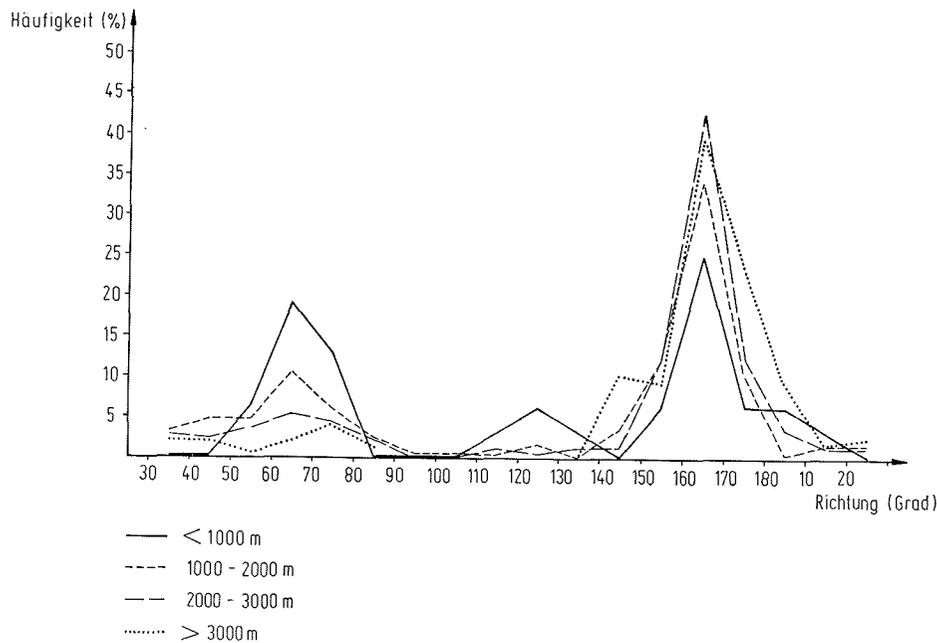


Abb. 5: Orientierung der Seen in Abhängigkeit von der Größe.
 Fig. 5: Orientation of lakes in relation to their size.

Diese Darstellung macht folgendes deutlich:

1. Ein verhältnismäßig stark ausgeprägtes Maximum der kleinsten Seen (Klasse I) bei 65°, das mit 19,3% lediglich 6% unter dem absoluten Maximum bei 165° liegt.
2. Die kleinen Seen (Klasse I u. II) zeigen bezüglich der Orientierung eine größere Streubreite als die großen (Klasse III und IV).
3. Eine relativ gleichförmige Abnahme des 65°-Maximums zugunsten der absoluten Richtung von Klasse I nach Klasse IV.

Die Abnahme geht von 19,3% bis 2,1%, wohingegen die absolute Richtungsverteilung von 25% bis 42% zunimmt. Je größer die Seen also werden, desto eindeutiger tendieren sie in die 165°- (= NNW/SSE) Richtung.

Dieser Zusammenhang verdeutlicht, daß die größeren Wasserflächen bevorzugt der vorherrschenden Windrichtung im Sinne der Ausbildung von leeseitigen Sandbänken und der damit auftretenden Seitenerosion unterworfen sind. Dies erscheint logisch, da größere Wassermassen bei gleicher Windrichtung stärker erosionswirksam werden können als kleinere Wassermassen.

Aufgrund dieser Überlegung und der fehlenden Korrelation der ENE/WSW-orientierten kleinen Seen mit der vorherrschenden Windrichtung kann abgeleitet werden, daß die Einregelung dieser Wasserflächen grundsätzlich anderen Faktoren zugeschrieben werden muß.

Eine weiterführende Deutung ergibt sich aus der lineamenttektonischen Situation des Gesamtgebietes, die durch ENE/WSW sowie NNW/SSE verlaufende Lineamente (Abb. 2, C) sowohl im anstehenden Mesozoikum des südlichen Bereiches als auch in der nördlichen Quartärüberdeckung der eigentlichen arktischen Küstenebene, dem Bereich der Seen, zum Ausdruck kommt.

Diese auch im Quartär der Küstenebene erkennbaren Lineationen können mit großer Wahrscheinlichkeit auf die primären Strukturen des mesozoischen Untergrundes zurückgeführt werden (Durchpauzeffekt). In ihrer Richtung entsprechen sie ziemlich genau der 65°- bzw. 165°-Orientierung, die bevorzugt von den kleinen Seen eingenommen wird.

Auf der Grundlage der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Orientierung und Größe der größeren Seen einerseits sowie der Orientierung und den dominierenden Lineament-Richtungen der kleineren Seen andererseits wird folgende erweiterte Orientierungstheorie zur Diskussion gestellt:

Die primäre Orientierung der Tauseen erfolgt entsprechend morphologisch-strukturell gebundener Gegebenheiten. Im Untersuchungsgebiet sind ENE/WSW und NNW/SSE streichende Lineamentrichtungen, an die die kleineren Seen mit einer gleichsinnigen Orientierung gebunden sind, deutlich ausgeprägt.

Die sekundäre Orientierung nach NNW/SSE wird von der Hauptwindrichtung aus ENE/WSW bestimmt, wobei bevorzugt die größeren Wasserkörper eine Orientierung entsprechend der Theorie von Carson und Hussey erfahren.

Literatur

- Black, R. F. and Barksdale, W. L., 1949: Oriented lakes of northern Alaska. *Journ. of Geol.*, 57, 105—118.
- Brewer, M. C., 1958: The thermal regime of an Arctic lake. *Amer. Geophysical Union Trans.*, 39, 278—284.
- Carlson, P. R. et al., 1959: Geology and mechanical stabilization of Cenozoic sediments near Point Barrow. In: The geology and engineering characteristics of some Alaskan Soils. *Iowa Engineering Experiment Station Bulletin*, 186, 101—128.
- Carson, C. E. and Hussey, K. M., 1962: The oriented lakes of arctic Alaska. *Journ. of Geol.*, 70, 417—439.
- Deevey, E. S., Jr., 1953: Paleolimnology and climate. In: Harlow Shapley, ed. *Climatic Change*. Cambridge: Harvard Univ. Press, 273—318.
- Kronberg, P., 1961: Luftbild Nord-Alaska. In: *Die Erde*, 4, 241—245.
- Livingstone, D. A., 1954: On the orientation of lake basins. *Amer. Journ. of Science*, 252, 547—554.
- Nithack, J., 1974: Gefügekundliche Untersuchungen an grobklastischen Sedimenten mit Hilfe terrestrisch-photogrammetrischer Methoden. *Diss. München* 1974, 105 S.
- Rosenfeld, G. A. and Hussey, K. M., 1958: A consideration of the problem of oriented lakes. *Iowa Academy of Science Proceedings*, 65, 279—287.
- Tedrow, J. C. F., 1969: Thaw lakes, thaw sinks and soils in Northern Alaska. *Biuletyn Peryglacjalny*, 20, 337—345.
- Wahrhaftig, C., 1965: Physiographic divisions of Alaska, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 482.
- Walker, H. J. and Arnborg, L., 1965: Permafrost and ice-wedge effect on river bank erosion. *Proc. Permafrost Intern. Conf.*, Washington, D. C.
- Washburn, A. L., 1973: Periglacial processes and environments. London, 320 S.