

# Zur Entstehung der Pingos im Mackenzie Delta, N. W. T.

Von Klaus Eberhard Bleich \*

**Zusammenfassung:** Die Pingobildung war ein Gefrierprozeß (gewöhnlich nach dem holozänen Klimaoptimum) in der Tauwanne von Seen mit flachem Wasser, wo sich an der Oberkante des Dauerfrostbodens ein Eiskern entwickelte, dem durch Kontraktionsrisse Seewasser zufloß.

**Summary:** Pingo formation has been a process of freezing (usually after the postglacial thermal maximum) in the thaw basin of lakes with shallow water, where an ice-core was formed at the margin of the permafrost zone, with water supply from the lake through contraction-cracks.

## *Vorwort*

Beim Besuch einiger Pingos in der Umgebung von Tuktoyaktuk (unteres Mackenzie Delta, N. W. T.) im Sommer 1973 wurden Ähnlichkeiten mit der Hügelbildung in anderen Gebieten der kanadischen Arktis festgestellt; daraus wird auf vergleichbare Vorgänge der Wassernachlieferung und Eisbildung geschlossen. Die Schlußfolgerungen bieten Anlaß, die bisher in der Literatur geäußerten Theorien zur Pingoentstehung zu überprüfen.

## *Einleitung*

Pingos sind Kuppen und Hügelzonen unterschiedlicher Form (rund, oval, langgestreckt, geschwungen), in denen überwiegend mineralische Sedimente durch einen Eiskern hochgepreßt und schräggestellt worden sind. Für die Pingos im Mackenzie-Delta wird entweder Entstehung aus Seebecken (MÜLLER 1959; MACKAY 1962) oder artesischer Grundwasseraufstieg (BOSTROM 1967) angenommen (die Vorläuferliteratur ist in den genannten Arbeiten aufgeführt). Nach MÜLLER entstehen die Pingos aus Seen, die eine kritische Größe von 300—400 m Durchmesser unterschreiten und deren Wasserstauer nicht tiefer als die Untergrenze der Permafrostzone liegt. Durch Zusammenrücken der steilen Flanken der Permafrostzone von den Ufern her wird das Wasser des ungefrorenen Seebodens eingeeengt und hochgepreßt; der Eiskern des Pingos entsteht über ein hydrolakkolithisches Zwischenstadium. MACKAY ändert MÜLLERs Anschauung dahingehend ab, daß die Einengung zwischen der sich schließenden Permafrostzone und der gefrierenden Seeoberfläche erfolgt, wobei einem kleinen Eiskern eine große Menge ungefrorenen Materials entspricht, auf deren äußere Form (wannen- oder trichterförmig) er sich nicht festlegt. BOSTROM hingegen nimmt ein Nachsacken und basales Auftauen der Permafrostzone in Bereichen starker Sedimentation und tektonischer Senkung an, wobei das freiwerdende Wasser zu den aufgebogenen Rändern von Synklinalen fließt und dort (aus 90—100 m Tiefe, wahrscheinlich an Verwerfungen) aufsteigt. Benachbarte Tümpel sollen vom Grundwasser aufgeheizte Stellen sein.

Wenn man der Seebeckenhypothese folgt, dann ist es schwierig, sich die Bildung eines reinen Eiskerns inmitten der Sedimente vorzustellen, aus denen das Wasser stammt (zumal diese heute voll wassergesättigt sind), selbst bei Annahme einer hohen Wasserkapazität und einer Filterwirkung. BOSTROMs Hypothese umgeht diese Schwierigkeit, impliziert aber so viele neue, daß sie eher von der Lösung wegführt. Die Pingos müßten demnach gerade im heutigen Delta in großer Zahl auftreten; dort fehlen sie jedoch mit Ausnahme der Westseite von Richard's Island. Zudem müßte das aufsteigende Wasser jenen zentralen Bereich des Dauerfrostbodens durchqueren, in dem die Temperatur am niedrigsten und frei von Schwankungen ist. Ferner müßten Quellaustritte in zahlreichen

---

\* Dr. Klaus Eberhard Bleich, Universität Hohenheim, D 7 Stuttgart 70, Allg. Bodenkunde.

Wasseransammlungen zu beobachten sein. Es bestehen aber enge Beziehungen zwischen Pingo und umgebender Landschaft, wie eine geraffte Darstellung der Geländebefunde nach MULLER und MACKAY verdeutlichen soll.

### *Lage, Bau und Alter der Pingos*

#### 1. Lage

Das Auftreten der Pingos wird nicht durch tektonische Leitlinien, sondern durch das Relief bestimmt. Die Pingos liegen wenig über Meeresniveau in flachen Depressionen und alten Seebecken, hier in Einzelfällen exzentrisch. Bis zu 1.400 Exemplare befinden sich in einem Gebiet mit welligem Relief, das aus pleistozänem Sand und Schluff besteht. 56% sind Inseln in Seen mit weniger als 3 m Wassertiefe oder teilweise von Wasser umgeben, 44% liegen in schlecht gedrähten Feldern von Tundrapolygonen, deren Entwässerung jetzt durch Flüsse oder durch die infolge Brandungserosion näherrückende Küste intensiviert wird. Die meisten sind asymmetrische Schwellungsformen, mehr löffel- als pfropfenförmig (manche ähneln Osern), und neigen mit zunehmender Größe zu Breitenwachstum; die größten sind gewöhnlich am Gipfel aufgebrochen und enthalten oft einen kleinen Kratersee, dessen Wassertiefe der benachbarten Auftauzone entspricht (etwa 1 m).

#### 2. Bau

Pingogröße und Mächtigkeit der Sedimenthülle stehen in Beziehung zueinander: Die Sedimente bilden  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{3}$  der Pingohöhe. Sie bestehen aus fluvialem Sand mit glazigen Blocklagen und aus einer Decke von stark reduzierten (pyrithaltigen) schluffigen Seesedimenten. Die Schichtung ist bis auf einzelne Lagen intakt, Verwürfungen wurden an Grenzen mit Schichtwechsel beobachtet (beim Übergang von Schluff zu Sand, von Feinsand zu Grobsand und vom Sedimentmantel zum Eiskern). Den Sedimentmantel durchziehen Eiskeile, die bis hinunter in den Eiskern reichen, aber auch in diesem Kern selbst können eigenständige kleine Kontraktionsrisse auftreten. Es wird hervorgehoben (von MACKAY), daß die typischen Pingos im nicht frostempfindlichen Sand vorkommen, während im Schluff 2—6 m dicke Eisschichten ausgebildet sind; auch einzelne Eislinsen in Schlufflagen zwischen Sandschichten wurden gefunden.

#### 3. Alter

Nirgendwo wurde bisher aktuelles Wachstum an Pingos beobachtet. Auffallend ist, daß der Eiskern der Pingos tief unter dem Seeboden in recht alten Sedimenten liegt, und daß bei einigen die Deckschicht (also jene Lage, deren weitere Akkumulation durch die Pingohebung unterbrochen wurde) mit verschiedenen Methoden ins holozäne Klimaoptimum datiert werden konnte. MULLER fand am Sityok-Pingo Mollusken wahrscheinlich einer wärmeren holozänen Klimaphase; er gibt 1962 (zit. nach MACKAY) für zwei Pingos ein Alter von 4.000 und 7.000 Jahren an. CRAIG (1959) datierte die Deckschicht an einem Pingo andernorts, dessen Lage den Mackenzie-Pingos vergleichbar ist, mit Hilfe von Pflanzenresten und Pollen sicher in eine wärmere Holozänphase und ermittelte hierfür ein Alter von  $5.500 \pm 250$   $^{14}\text{C}$ -Jahren. MACKAY gibt für den Aufwuchs an Torfpolygonen, die zum Pingo hin auskeilen und somit nach dessen Hebung entstanden, eine durch  $^{14}\text{C}$  bestimmte Rate von 0,3 bis 0,5 m pro Jahrtausend an (EMBLETON und KING zitieren diese Werte als durchschnittliches Pingowachstum); daraus ergibt sich dort ein Pingoalter von 3.000—5.000 Jahren. Die weiteren Altersbestimmungen mögen hier unberücksichtigt bleiben, da sie nur relative Werte ergeben. Insbesondere läßt sich aus der Eiskeilbreite schlecht auf das Pingoalter schließen, da diese aus der Hebung des Pingos resultiert und über die Hebungsrates bisher nichts bekannt ist.

Einige Pingos sind demnach, wie bereits MACKAY 1962 anführt, durch Einwirken einer

Klimaverschlechterung auf das bestehende Relief entstanden, mithin durch das Übergreifen des Dauerfrostzustandes auf bisher ungefrorenes Material. Daß dieser Vorgang in der Niederen Arktis auf besonders günstige Voraussetzungen traf, lag nicht in dem labilen Gleichgewicht zwischen dem gefrorenen Untergrund und dem Wärmehaushalt seiner Umgebung begründet. Mit anderen Worten, es war nicht die sommerliche Auftautiefe, an deren Unterkante die Eiskernbildung für die Pingos anzusetzen wäre; dafür sind die Werte, die sich aus der Mächtigkeit der Sedimenthülle ergeben, einfach zu groß (am Ibyuk-Pingo ca. 14 m). Vielmehr sind ungefrorene Bereiche solcher Mächtigkeit als Tauwannen unter Seen zu erwarten (BROWN 1972), und damit sind auch die Gesetzmäßigkeiten im Aufbau der Pingos in Einklang zu bringen: Je größer der See, desto mächtiger die Tauwanne, desto tiefer auch die Eiskernbildung und desto größer der Pingo. Die Vorstellungen von MÜLLER und MACKAY, nach denen eine kritische Wassertiefe (von höchstens 3 m) unterschritten werden müsse, um die Pingobildung in Gang zu bringen, können mit der Präzisierung hierher übernommen werden, daß während des holozänen Klimaoptimums offenbar eine geringere Wassertiefe genügte, um das Frieren des Seegrundes zu verhindern als in der danach folgenden Klimaverschlechterung; zugleich erklärt sich damit die zum Ufer verschobene Lage von Pingos in größeren Seebecken.



**Abb. 1:** Kontraktionsspalte, in einigen m Tiefe offen (ca. 15 cm breit), an einem Pingo südwestlich von Tuktoyaktuk.

**Fig. 1:** Contraction-crack, open in several metres' depth (about 15 cm), at a pingo southwest of Tuktoyaktuk.

#### *Der Vorgang der Pingobildung*

Haben die bisherigen Ausführungen die Möglichkeiten stark eingeschränkt, die Entstehung des Pingoises durch Wasserlieferung aus dem ungefrorenen Untergrund zu erklären, so soll im folgenden gezeigt werden, daß eine derartige Wasserbewegung gar

nicht möglich war. Aus der Erhaltung der Feinschichtung selbst bei den stark gehobenen Sedimentdecken und (am Sityok-Pingo) aus der Zerlegung in große ungestörte Schollen, die in einer Eismasse „schwimmen“, ist zu entnehmen, daß die Sedimente schon bei Beginn der Pingobildung gefroren waren. Das ist bei der vorher geäußerten Bedingung, daß der Seegrund nach Unterschreitung einer bestimmten Wassertiefe gefrieren müsse, auch nicht anders zu erwarten. Die weitere Entwicklung läßt sich an den Pingos ablesen: Die Sedimente der Auftauwanne unterlagen zu Beginn des Gefrierens einer Quellung, die eine erste Hebung verursachte und damit die isolierende Wasserschicht noch mehr verringerte. Bei stärkerer Abkühlung setzte eine Kontraktionsschrumpfung ein (LACHENBRUCH 1962), bei der vielerorts das in der Umgebung vorhandene Eiskeilnetz weiter ausgebaut wurde. Es ist naheliegend, darin die Wasserleitbahnen für den Eiskern zu sehen. Ausschlaggebend dafür, daß das Wasser erst im Zentrum des Pingos gefror, ist der Umstand, daß einerseits schon ein geringer Druck ( $2,64 \text{ kg/cm}^2$ ) genügt, einsickerndes Wasser durch Verdichtung auf  $4^\circ\text{C}$  zu erwärmen, daß aber andererseits bei Unterkühlung am Übergang von  $0$  auf  $-0,3^\circ\text{C}$  ein hoher Druck ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ) frei wird. Wenn MÜLLER 1959 einen Zusammenhang zwischen Eiskeil- und Pingobildung bestreitet, dann geschieht dies wohl unter dem Eindruck, daß die Eiskeilfüllung von dem Pingokern deutlich abgesetzt ist. Indessen zeigen diese Verhältnisse, auf die noch nachfolgend eingegangen wird, ein Spätstadium an. Es gibt Kontraktionsrisse in großen Pingos, die heute noch teilweise offen sind (Abb. 1); im Mackenzie-Delta sind sie nicht selten der Anlaß für eine Aufwölbung, die streng dem oberirdischen Verlauf der Risse folgt (Abb. 2); in klei-



Abb. 2: Aufwölbung längs einer Eiskeilspalte bei Tuktoyaktuk (Luftbild).  
 Fig. 2: Swelling at an ice-wedge near Tuktoyaktuk (aerial view).

neren Dimensionen (bis meterhoch) läßt sich Hügelbildung an Eiskeilkreuzungen auch in der Mittleren Arktis beobachten (so nördlich von Umingmak I am Shoran Lake auf Banks Island). Ein Modellbeispiel für Eiskernbildung bei lateraler Wassernachlieferung wurde an der Brandungsküste nahe bei Sachs Harbour auf Banks Island beobachtet (Abb. 3; die Kenntnis dieses Aufschlusses und das Photo wird Herrn cand. phil. W. Torke/Tübingen verdankt). Während nun die Aufwölbung zunächst die Kontraktionsspalten erweitert und damit die Wasserzufuhr verstärkt, wird ein wachsender Teil des Eiskeilnetzes durch die weitere Hebung von der Zulieferung ausgeschlossen und in der Folge von der Auf-



Abb. 3: Eiskern mit lateraler Wasserzulieferung an der Küste bei Sachs Harbour/Banks Island. — Photo W. Torke/Tübingen.

Fig. 3: Ice-core with lateral water supply at the coast near Sachs Harbour/Banks Island.

tauzone her durch Sickerwasser mit Eis ausgekleidet. Damit ist das Stadium erreicht, in dem der Eiskern seitlich weiterwächst, und zwar in Richtung der stärksten Wasserlieferung. — Eine zusammenfassende Darstellung der Pingoentstehung zeigen Abb. 4, 5 und 6.

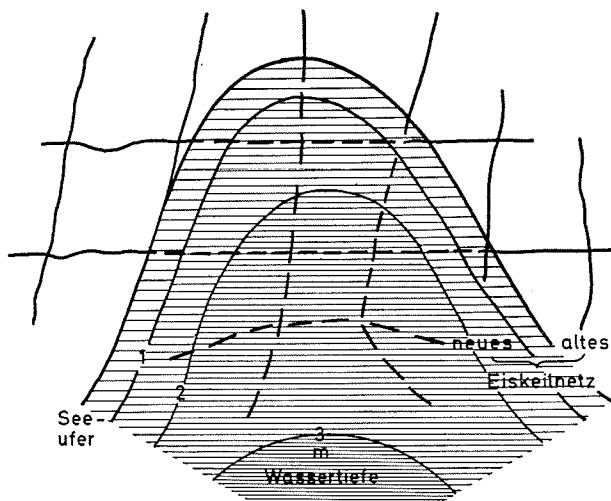


Abb. 4: See zu Beginn der Pingogebildung.

Fig. 4: Lake at the beginning of pingo formation.

Es ist anzunehmen, daß die Kontraktion der gefrierenden Beckensedimente von einer Schicht zur nächsten und vom Eiskern differiert (auf die eigenständige Schrumpfung des Eiskerns wurde bereits hingewiesen); vielleicht lassen sich die „Kryoturbationszonen“ am Ibyuk Pingo (MULLER 1959) auf Kontraktionsunterschiede zurückführen. Im Eiskern selbst scheint auch Schichtenversatz an Scherspaltan stattzufinden, wie an einem von der

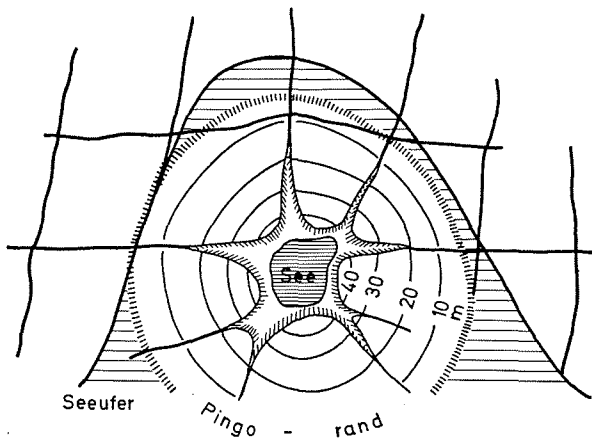


Abb. 5: Endstadium der Pingobildung.  
Fig. 5: Final stage of pingo formation.

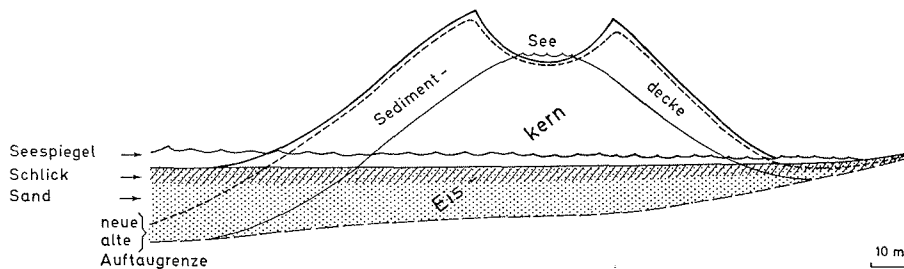


Abb. 6: Pingobildung in der Auftauwanne eines Sees im Schnitt.  
Fig. 6: Section of pingo formation in the thaw basin of a lake.

Brandung angeschnittenen Hügel bei Tuktoyaktuk zu beobachten war; die Scherflächen zogen schräg durch das Eis, wobei jeweils das Hangende zentrifugal gegen das Liegende versetzt war.

#### *Pingos im Verfallsstadium*

Mit der Fixierung der Pingobildung auf den holozänen Klimagang wird die Annahme von verfallenen Pingos im Mackenzie Delta problematisch. Auf die hierfür in Frage kommenden Formen und die verschiedenen Erklärungsmöglichkeiten für deren Entstehung wird hier nicht eingegangen. Es muß jedoch betont werden, daß das Aufbrechen des Pingogipfels und die Ausbildung eines Kratersees noch keine Zerstörungsform ist, sondern aus der Dehnung der Sedimenthülle und der Bildung einer sommerlichen Auftauzone resultiert.

#### *Konsequenzen für die Nomenklatur*

Die hier vorgeführten Formen unterscheiden sich in ihrer Genese so grundlegend von den „open-system“-Pingos in Ostgrönland (MULLER 1959), daß für letztere ein neuer Name zu überlegen wäre, zumal Formenkonvergenzen ja auch anderswo in der Geo-

morphologie nicht ausschlaggebend für die Benennung sind (Beispiel: Toteislöcher im Gletschervorfeld und Erdfallen in Lehmsenken von Karstgebieten). Auf den Unterschied zu anderen Hebungsformen im Periglazialbereich ist LUNDQVIST 1969 eingegangen.

#### Literatur

- Brown, R. J. E.: Permafrost in the Canadian Arctic Archipelago. — Z. Geomorph. N. F. Suppl. Bd. 13, Berlin, Stuttgart 1972.
- Bostrom, R. C.: Water Expulsion and Pingo Formation in a region affected by Subsidence. — J. Glaciology 6, No. 46, 1967.
- Craig, B. G.: Pingo in the Thelon Valley. N. W. T., usw. — Bull. Geol. Soc. America 70, 1959.
- Embleton, C. and King, C. A. M.: Glacial and Periglacial Geomorphology. — E. Arnold (Publ.) Ltd., London. Oxford 1968.
- Lachenbruch, A. H.: Mechanisms of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. — Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 70, 1962.
- Lundqvist, J.: Earth and ice mounds: a terminological discussion, in: T. L. Péwé, The Periglacial Environment, Montreal 1969.
- Mackay, J. Ross: Pingos of the Pleistocene Mackenzie-Delta Area. — Geogr. Bull. 18, 1962.
- Müller, F.: Beobachtungen über Pingos. — Medd. om Grønland 153, Nr. 3, 1959.