

Fernerkundung in arktischen Periglaziallandschaften – Auf den Spuren der Permafrostdynamik

Guido Große, Dirk Wagner, Lutz Schirrmeister

Der gegenwärtige Klimawandel verändert Gebiete mit dauerhaft gefrorenen Böden, den so genannten Permafrost in der Arktis. Im Zuge der Klimaschwankungen der jüngsten Erdgeschichte im Quartär erfuhren diese von Dauerfrost geprägten Landschaften immer wieder Umformungen des Reliefs. Die verschiedenen Oberflächenformen und -eigenschaften dieser Periglaziallandschaften sind somit Zeugen der Permafrostdynamik und des quartären Klimageschehens. Sie lassen sich mit Hilfe von Fernerkundungstechniken und geographischen Informationssystemen (GIS) qualitativ und quantitativ erfassen und stellen damit ein wichtiges Archiv der Klimageschichte dar.

Der ausgedehnte und bis 1,5 Kilometer tief reichende Permafrost in Sibirien ist das Ergebnis langfristig stabiler, kaltklimatischer Bedingungen im Pleistozän (vor 1,8 Mio Jahre – 10 000 Jahren). Während der letzten Kaltzeit entstand in weiten Tieflandsgebieten der nord- und zentralsibirischen Arktis eine 20-60 Meter mächtige, eisreiche Permafrostzone, der so genannte Eiskomplex. Dieser reagierte sehr sensibel auf die schnelle Klimaerwärmung vor ca. 12-10 000 Jahren, was zu einer oberflächennahen Zerstörung des Permafrostes innerhalb von wenigen hundert Jahren führte. Eine massive Landschaftsveränderung war die Folge (Abb. 20). Daher können Permafrostentstehung, -verbreitung und -degradation als Klimaindikatoren betrachtet werden.

Remote sensing in Arctic periglacial landscapes – The tracing of permafrost dynamics

Guido Große, Dirk Wagner, Lutz Schirrmeister

Current climate change is impacting perennial frozen ground in the Arctic, so-called permafrost. The permafrost-dominated periglacial landscapes were influenced by recurring relief changes during the climate fluctuations in the younger, quaternary, history of Earth. Therefore, the existing different surface structures and surface properties of these landscapes are witnesses of permafrost dynamics and quaternary climate events. Their qualitative and quantitative properties can be recorded by applying remote sensing techniques and geographical information systems (GIS) and thus provide an important archive for climate history.

The extent and up to 1.5 kilometre deep permafrost in Siberia is a result of long-term stable and cold-climatic conditions during the Pleistocene (from 1.8 million years – 10,000 years). A 20-60 meter thick deposit of ice-rich permafrost, the so-called ice complex, was formed in the wide lowland regions of the North and Central Siberian Arctic during the last cold stage. These highly sensitive deposits reacted rapidly on the fast climate warming approximately 12-10,000 years ago, resulting in the destruction of permafrost close to the surface within a few hundred years. Massive changes in landscape morphology were the result (Figure 20). Hence, permafrost formation, distribution, and degradation can be considered as climate indicators.

Due to the thawing of ground ice the landscape surface is settling, and depressions, lake basins, and



Abb. 20: Typische Periglaziallandschaft Nord-ostsibiriens mit Thermokarstsenken und Talsystemen (Bykovsky Halbinsel, östliche Laptevsee).

Fig. 20: Typical periglacial landscape in North-east Siberia, showing thermokarst depressions and valley systems (Bykovsky Peninsula, Eastern Laptev Sea) (Photo: M. Krbetschek, 1998, Saxon Academy of Sciences).

Durch das Tauen von Grundeis senkt sich die Geländeoberfläche ab und es bilden sich nachfolgend Senken, Seebecken und Talsysteme, der so genannte Thermokarst. Diese Landschaftsformen lassen sich in den vegetationsarmen Tundragebieten mit Hilfe von Fernerkundung gut untersuchen. Periglaziale Landschaften wurden anhand von hoch auflösenden Satellitenbildern (Landsat-7, Corona), digitalen Geländemodellen und Felddaten aus den Küstengebieten der Laptevsee charakterisiert und klassifiziert (Abb. 21). Hauptaugenmerk lag dabei auf der räumlichen Verbreitung von Thermokarst. Anhand dieser Daten lassen sich Umweltinformationen vergangener Zeiten von ausgewählten Orten auf größere Räume übertragen und die Ablagerungsbedingungen spätquartärer Periglaziallandschaften (z.B. Aufschüttungsebene oder

valley systems are formed. This process and its forms is the so-called thermokarst. The structures can be easily observed in tundra regions sparsely covered with vegetation by applying remote sensing methods. High-resolution satellite images (Landsat-7, Corona) were used for the characterization and classification of periglacial, permafrost-dominated landscapes in the coastal lowlands of the Laptev Sea (investigation areas in Figure 21). The focus of the study was the investigation of the spatial distribution of thermokarst. These data allow the transfer of palaeo-environmental information from distinct localities to a larger region. Furthermore, the depositional environment in Late Quaternary periglacial landscapes (e.g. an accumulation plane, or thermokarst) can be reconstructed. The investigation areas in the North Siberian coastal lowland are influenced by thermokarst up to 78 % of the total area (Figure 22).

The thermal and simultaneous mechanical destruction of permafrost, called thermo-erosion, results in a massive coastal retreat of several meters per year at Arctic ice-rich permafrost coasts. High-resolution aerial and satellite imagery from 1950-2005 were used for the assessment of coastal retreat rates and coastal dynamics. Based on GIS analyses, the future evolution of such coasts and resulting ecological and economical challenges can be forecasted.

Beyond the balancing of sediment, freshwater, and organic carbon released and relocated during permafrost destruction, another focus was the indirect quantification of trace gases fluxes from permafrost landscapes. The greenhouse gas methane is produced by microbial activity also during permafrost degradation. The systematic classification of permafrost surfaces using remote sensing data was applied to the Siberian Lena Delta region. As a result, local

Thermokarst) rekonstruieren. Die Untersuchungsgebiete im nordsibirischen Küstentiefland sind bis zu 78 % der Gesamtfläche von Thermokarst beeinflusst (Abb. 22).

Die als Thermoerosion bezeichnete, thermische und gleichzeitige mechanische Zerstörung von Permafrost führt an eisreichen arktischen Küsten zu einem massiven Küstenrückgang mit Raten von bis zu mehreren Metern pro Jahr. Hochauflösende Luft- und Satellitenbilder von 1950-2005 wurden erfolgreich für die Bewertung der Rückgangsraten und der Dynamik der Küsten eingesetzt. GIS-Analysen helfen dabei, Prognosen für den zukünftigen Küstenverlauf und daraus resultierender ökologischer und ökonomischer Herausforderungen zu erstellen.

Neben der Bilanzierung von Sediment, Süßwasser und Kohlenstoff, die im Zuge von Permafrostdegradation freigesetzt und umgelagert werden, stehen auch indirekte Bestimmungen von Spurengasflüssen im Blickpunkt. Das Treibhausgas Methan wird als mikrobielles Umsatzprodukt unter anderem bei der Permafrostdegradation freigesetzt. Die gezielte Klassifizierung von Permafrostoberflächen mit Fernerkundungsdaten wurde beispielhaft am sibirischen Lena-Delta eingesetzt. Damit konnten lokale Emissionsmessungen von Methan, wie sie von der Forschungsstelle Potsdam im Lena-Delta durchgeführt werden, aus den verschiedenen Tundrenoberflächen auf regionale Skalen übertragen werden. So haben z.B. trockene bis feuchte, von Zwergsträuchern dominierte Tundrenflächen mit 6,3 % zwar einen geringen Anteil an der Gesamtfläche, tragen aber mit 50 % zur Gesamtemission bei. Dagegen haben Böden mit geringer Wassersättigung zwar einen 30 %igen Flächenanteil, sind aber nur mit 0,4 % an der Methanemis-

measurements of methane emissions carried out by AWI Potsdam staff in the delta on different tundra surface types, were transferred to a regional scale. Dry to wet dwarf-shrub dominated tundra has a small total area (6.3 %) in the Lena Delta but contributes to about 50 % of the total emission. In contrary, soils with low water saturation have a high total area (30 %), but contribute to only 0.4 % of the total methane emission. Weighted by the total area of individual classes, the methane emission in the Lena Delta is about 23.7 milligramme CH₄ per squaremetre and day. This results in a daily emission of about 690 tons of methane for the entire Lena Delta. Considering the seasonal characteristics of methane emission, an annual methane emission of 78,600 tons was calculated.

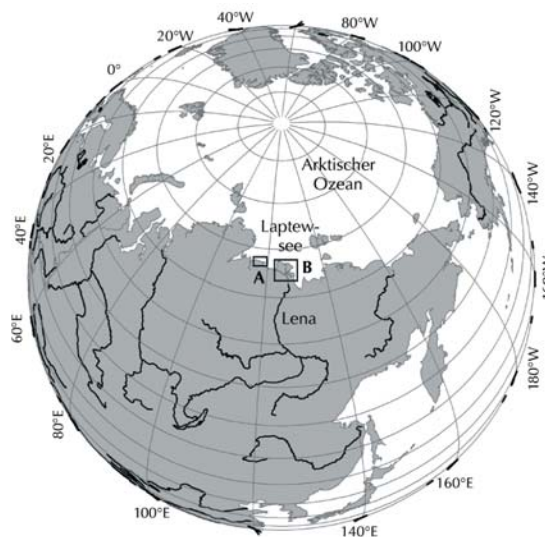


Abb. 21: Übersichtskarte mit den Untersuchungsgebieten A) Kap Mamontov Klyk und B) Lena-Delta im Permafrost-dominierten Küstentiefland Nordostsibiriens.

Fig. 21: Location of the investigation areas in the permafrost-dominated coastal lowland of North Siberia A) Cape Mamontov Klyk and B) Lena Delta.

sion beteiligt. Gewichtet nach den Flächenanteilen der einzelnen Klassen betragen die Methanemissionen 23,7 Milligramm Methan pro Quadratmeter und Tag, was eine tägliche Emission von 690 Tonnen für das gesamte Lenadelta ergibt. Unter Einbeziehung des jahreszeitlichen Emissionsverlaufs wurde daraus ein jährlicher Methanausstoß von 78600 Tonnen bilanziert.

Abb. 22: Die auf Landsat-7-Daten, Geländemodellen und Felddaten basierende Landschaftsklassifikation des Untersuchungsgebietes zeigt Seen und Täler, die durch Tauen des Permafrostes im Frühholozän (10-8 000 Jahre v.H.) entstanden sind (Kap Mamontov Klyk Region, westliche Laptewsee).

Fig. 22: The landscape surface classification based on Landsat-7 imagery, terrain models and field data shows lakes and valleys formed by permafrost destruction during the Early Holocene (10,000-8,000 years ago) (Cape Mamontov Klyk region, western Laptev Sea).

