

Wilfried Endlicher (Freiburg im Breisgau)

Der peripher-zentrale Wandel des Ökotopengefüges im Hudson-Bay-Tiefland

analysiert mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden*)

Mit 8 Luftbildern und 4 Figuren, davon 1 mehrfarbige digitale Karte als Beilage

Das Ökotopengefüge des Hudson/James-Bay-Tieflandes, einer Sumpflandschaft in Nordontario, wird in seinem Wandel von der James-Bay-Küste zum Zentralteil um die Sutton Ridges vorgestellt. Dieses Luftbildprofil zeigt im Rückblick, wie sich der Naturraum seit seinem isostatischen Auftauchen aus der Tyrrell See verändert hat. Die Sukzession geht dabei von Marsch über Niedermoor zum Hochmoor und bei Permafrosteinfluß bis zu Torfplateaus. Eine flächendeckende Klassifizierung der Ökotope eines Testgebietes aus einem LANDSAT-Bild wurde mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungsmethoden versucht. Methodik und Problematik dieses Verfahrens werden diskutiert.

Summary: The ecotopic patterns of the Hudson Bay Lowlands and their peripheric-central change shown by means of remote sensing.

The ecotopic patterns of the Hudson Bay Lowlands, a wetland in northern Ontario, are shown in their change from the James Bay coast to its central part near the Sutton Ridges. This air photo profile shows how the natural landscape has changed since its isostatic uplift out of the Tyrrell Sea. The succession goes from marsh to fen, from fen to bog, and, by permafrost occurrence, to peat plateaus.

The classification and mapping of the ecotops around Opinnagau Lake was possible with digital LANDSAT-image interpretation and ink jet printing. This method and its critical points are discussed.

1. Einleitung

Die Hudson/James Bay wird im Westen und Süden von einem wechselnd breiten Tieflandstreifen eingerahmt, der mit 324 000 km² die Ausdehnung der Bundesrepublik um 1/5 übertrifft und der zu 20 % der Provinz Manitoba, zu 80 % der Provinz Ontario zugerechnet wird. Das Tiefland wird von den anstehenden Gesteinen des Präkambrischen Schildes begrenzt. Seine Physiographie wird von mehreren Faktoren bestimmt.

Die ungefalteten paläozoischen Sedimente, zumeist Kalke, Dolomite und Sandsteine, sind flachlagernd und fallen nahezu unmerklich zum Zentrum der Hudson Bay ein. Nur an wenigen Stellen, z. B. am Attawapiskat River, sind die Kalke angeschnitten und Verkarstungserscheinungen festzustellen. Fast ausnahmslos fehlt jegliche Relieferung, so

*) Herrn Dr. Simsek Pala, Ontario Centre for Remote Sensing, Toronto, bin ich für seine zukommenden Auskünfte und immerwährende Unterstützung zu ganz besonderem Dank verpflichtet. Das gleiche gilt auch für Herrn John Riley vom Royal Ontario Museum, Toronto. Meinen Dank möchte ich auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die großzügig gewährte Reisebeihilfe aussprechen.

daß die Höhenlage von der Küste bis zum Präkambrischen Schild auf kaum 200 m ansteigt. Zu den Ausnahmen zählen die präkambrischen Auslieger der Sutton Ridges. Die ordovizischen Dolomite und Kalke sind hier entfernt und präkambrische Diabase und metamorphe Sedimente treten als spektakuläre Landstufe mit Höhen bis 275 m in Erscheinung.

Auf das Fundament des Anstehenden ist zweitens eine z. T. 50 m und mehr mächtige Decke von quartären Sedimenten aufgelagert. Hierzu rechnen zum einen das Grundmoränenmaterial (*glacial till*) der verschiedenen Eiszeiten in meist feinkörnig-lehmiger Ausbildung als Verwitterungsprodukt der relativ weichen Sedimente. Zu einem geringeren Teil sind aber auch lakustrische Sedimente verbreitet. Das Eis der Hudson Bay blockierte am Ende der Wisconsin-Vereisung die Flüsse und staute sie zu kurzlebigen Seen auf, was zur Sedimentation von Beckentonnen führte.

Als drittes Element ist der Meereseinbruch der Tyrrell See nach dem Ende der Wisconsin-Vereisung, ca. 8000–7500 vor heute, zu nennen. Der Bereich dieser marinen Ingression im durch die Eislast isostatisch abgesenkten Tiefland ist durch den Verlauf fossiler Küstenlinien gut markiert und stimmt etwa mit der Grenze zum Präkambrischen Schild überein [CRAIG 1969, p. 67]. Zur glazialen und lakustrischen Fazies tritt nun eine litoral-neritische, zumeist lehmige Schluffe. In dem sich seither langsam hebenden Tiefland bilden dabei die große Zahl der Strandwälle (*Beach Ridges*) eine wichtige Landschaftskomponente. Sie zeigen den jeweiligen temporären Küstenverlauf bei der anhaltenden Hebung an. Ihr Substrat setzt sich überwiegend aus gewaschenem Sand und Kies mit hohem Quarzanteil zusammen.

Das fehlende Gefälle (ca. 0,5–1,0 m/km), die Versiegelung des Untergrundes durch die Ton-Schluff-Sedimente und die Zergliederung durch die meist quer zur Hauptabflußrichtung verlaufenden Strandwälle sind die Hauptgründe dafür, daß das Hudson/James-Bay-Tiefland eine extrem schlecht drainierte Sumpflandschaft darstellt. Sie wird entweder einfach als ein *Wetland* oder mit dem indianischen Begriff als *Muskeg* (etwa „Sumpfwald“) bezeichnet. „*The main characteristic of the lowland during the summer is wetness. When seen from the air, the land looks as if it has risen recently out of Hudson Bay*“ [BIRD 1980, p. 218].

Dieses edaphische Gerüst wird durch klimatische Parameter modifiziert. Die Jahresniederschläge nehmen vom kontinentalen Nordwesten zum maritimeren Südosten von 510 mm auf 760 mm zu [CHAPMAN & THOMAS 1968]. Die mittleren täglichen Maxima der Lufttemperatur liegen im Juli im Süden (Moosonee) bei ca. +22°C, die mittleren täglichen Minima im Januar bei ca. –27°C. Die Isothermen verlaufen in west-östlicher Richtung. In der James Bay hält sich eine Eisdecke von November bis Mai, und das Tiefland ist fast gänzlich dem Permafrostbereich zuzuordnen. Die Südgrenze diskontinuierlichen Permafrostes wird von BROWN [1973, pp. 35 sq.] mit ca. 51° N angegeben und erreicht an der Südspitze der James Bay ihre südlichste Lage in Kanada außerhalb der Kordilleren. Das gleiche gilt für die Zone kontinuierlichen Permafrostes, die einen schmalen Streifen entlang der Hudson Bay einnimmt und am Nordende der James Bay ebenfalls die südlichste Lage in Kanada aufweist. Eine Abgrenzung dieser Zonen aufgrund von klimatologischen Meßwerten ist bei nur zwei langjährig betriebenen Klimastationen nicht möglich. Deshalb muß auf die Interpretation von Permafrostmustern anhand von Luftbildern und ergänzend dazu auf Bohrkampagnen, die allerdings nur mit Hubschraubereinsatz möglich sind, zurückgegriffen werden. Derartige Untersuchungen von RILEY [1981 b] erlauben eine detailliertere Untergliederung insbesondere der breiten Übergangszone, in der Permafrost nur noch sporadisch auftritt (Fig. 1).

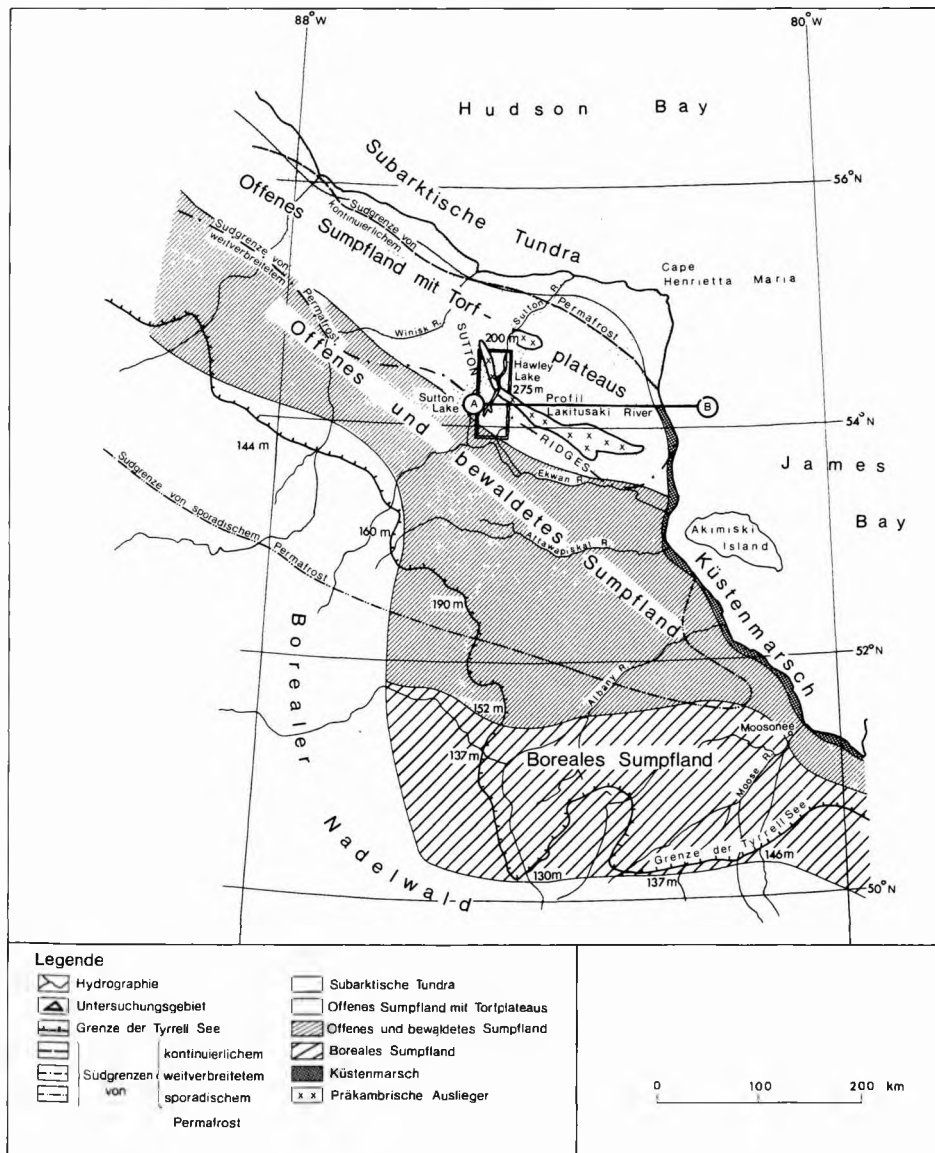


Fig. 1: Vegetationsgliederung und Permafrostverteilung im Hudson-Bay-Tiefland (unter Verwendung von RILEY 1981 b; Grenze der Tyrell See nach CRAIG 1969).

2. Das Ökotopengefüge des Tieflandes

Das Ökotopengefüge des Hudson/James-Bay-Tieflandes, also die charakteristische Anordnung homogener Standorteinheiten, ist wesentlich reicher, als es die Topographische Karte im größten bisher vorliegenden Maßstab 1 : 250 000 vermuten läßt. Aus ihr läßt sich praktisch nur die Untergliederung in einen Küstenstreifen und in eine Inlandsumpfbzone (*Muskeg*) durchführen.

Die ersten Schritte zu einer Physiographie des Tieflandes wurden in den 50er Jahren von COOMBS [1954], HUSTICH [1957] und SJÖRS [1959] unternommen. Schon in ihren Untersuchungen bildeten Luftaufnahmen das tragende Gerüst. RADFORTH [1969] gliederte mit ihrer Hilfe „*airform patterns*“ aus, doch erwies sich dieser Weg als wenig gangbar, da hier die ökologischen Zusammenhänge kaum Berücksichtigung fanden. Der Einsatz von Hubschraubern seit den 60er- und die LANDSAT-Satellitenbilder seit den 70er-Jahren ließen die Komplexität der Landschaft immer deutlicher werden. Mit diesen neuen Hilfsmitteln konnten nun neue Landschaftsgliederungen nach physiognomisch-ökologischen Einheiten entwickelt werden [JEGUM et al. 1974; RILEY 1981 a, b; SIMS & WICKWARE 1981]. Als wichtigste Ökotope der Sumpflandschaft wären danach aufgrund morphologischer Form, Vegetationszusammensetzung (u. a. Zeigerpflanzen), pH-Wert, Tiefe des Grundwasserspiegels, Torfmächtigkeit und eventuell Permafrostmuster die folgenden zu nennen:

1. Torffreie, höherliegende Landschaftseinheiten (*Upland*)
 - 1.1 Ausbeißende Felsburgen des Anstehenden (*Bedrock Outcrops*)
 - 1.2 Erosionsformen im Grundmoränenlehm
 - 1.2.1 Rinnentäler (*Subglacial Channels*)
 - 1.2.2 Flußanschnitte (*River Cuts*)
 - 1.3 Akkumulationsformen verschiedenen Alters
 - 1.3.1 Sanderflächen (*Glacial Outwash*)
 - 1.3.2 Strandwälle (*Beach Ridges*)
 - 1.3.3 Rezente Hochufer (*River Levees*)
2. Sumpfland (*Muskeg*)
 - 2.1 Offene Wasserflächen
 - 2.1.1 Hochmoorblänken (*Bog Pools*)
 - 2.1.2 Niedermoorblänken (*Fen Pools, Flarks*)
 - 2.1.3 Randsümpfe (*Laggs*)
 - 2.1.4 Mergelseen (*Marl Lakes*)
 - 2.2 Hochmoore (*Bogs*)
 - 2.2.1 Wiesenhochmoore (*Open Bogs*)
 - 2.2.2 Waldhochmoore (*Treed Bogs*)
 - 2.3 Niedermoores (*Fens*)
 - 2.3.1 Strangniedermoores (*Patterned Fens*)
 - 2.3.2 Waldniedermoores (*Treed Fens*)
 - 2.4 Sonstige Sumpfformen (*Swamps*)
 - 2.5 Marsch (*Marsh*)
 - 2.5.1 Watt (*Tidal Marsh*)
 - 2.5.2 Springflutsalzmarsch (*Supertidal Marsh*)
 - 2.5.3 Süßwasseraltmarsch (*Freshwater Marsh*)

2.6 Torfformen mit Permafrostkern

2.6.1 Palsas

2.6.2 Torfplateaus (*Peat Plateaus*)

In den folgenden Abschnitten sollen nun nicht die Abgrenzungskriterien dieser Ökotope beschrieben und begründet werden. Vielmehr soll der auffällige Landschaftswandel, der auf Luft- und Satellitenbildern vom Tieflandsrand an der James Bay bis zum Zentralteil um den Sutton Lake verfolgt werden kann, vorgestellt und begründet werden.

3. Landschaftsökologisches Ost-West-Profil entlang des Lakitusaki Rivers (54° 20' N)

In seiner Übersichtskarte des Ontario-Teiles des Tieflandes gliedert RILEY [1981 b] fünf Zonen aus (Fig. 1):

Das Boreale Sumpfland (*Boreal Wetland* oder *Boreal Muskeg*) im Süden bildet den praktisch permafrostfreien Südsaum zum Borealen Nadelwald. Die Komponente des geschlossenen Waldes ist hier noch vergleichsweise stark vertreten (vgl. PALA & WEISCHET 1981). Sie tritt im den sich nordwärts anschließenden offenen und bewaldeten Sumpfland (*open and treed Wetland* oder *open Wetland/Muskeg*) zurück. Das offene Torfplateau-Sumpfland mit weitverbreitetem Permafrost und dementsprechend zahlreichen Torfplateaus wird durch die Baumgrenze von der maritim induzierten subarktischen Tundra getrennt. Aus floristischen und klimatischen Gründen ist der überwiegende Teil der James-Bay-Küste dagegen als Marsch aufzufassen. Die Vegetation ist wesentlich artenreicher als in der Tundra, und Permafrostmuster fehlen.

Neben diesem planetarischen ist der peripher-zentrale Wandel von der James Bay ins Landesinnere besonders interessant, da er gleichzeitig einen Rückblick auf die Entwicklung des Naturraumes in den letzten 8000 Jahren erlaubt. Vor dieser Zeit lag das Tiefland unter der Tyrrell See und höchstens die Spitzen der Sutton Ridges bildeten kleine Inseln. Für die Untersuchung standen flächendeckende LANDSAT-Farbkompositen (Juli 1974) im Maßstab ca. 1 : 250 000 und Schwarz-Weiß-Stereo-Luftbildpaare (Juni 1976) im Maßstab 1 : 60 000 zur Verfügung. Ein charakteristischer, ca. 170 km langer Abschnitt in der Breitenlage von Kiel (ca. 54° 20' N) wurde ausgewählt, entlang dem typische Landschaftsausschnitte in Form von interpretierten Luftbildern vorgestellt werden (Fig. 2).

3.1 James Bay

Bild 1 zeigt die Küste südlich der Mündung des Lakitusaki Rivers. Die James Bay ist hier wie überall extrem flach, im Mittel nur 28 m tief. Die hohe Süßwasserzufuhr im Sommerhalbjahr führt bei dieser geringen Tiefe zu einem sehr niedrigen Salzgehalt und einem hohen Mineralreichtum des Wassers. Die Tide reicht oft mehrere Kilometer weit.

3.2 Küstenmarsch

Auf *Bild 1* können weiter deutlich 3 küstenparallele Streifen unterschieden werden: Ein heller, von dunkleren Bachmündungen durchsetzter Streifen direkt an der Küste. Hierbei handelt es sich um das regelmäßig bei Flut von Salzwasser überspülte Watt mit halophiler Vegetation. An sie schließt sich ein mittelgrauer, gesprenkelter Streifen an. Er dürfte nur noch bei Springfluten von Salzwasser erreicht werden und deshalb zur Springflutsalz-marsch zählen. Das fleckige Mikrorelief deutet auf vegetationsfreie Stellen hin. Sie entstehen häufig dann, wenn die Vegetationsdecke an Eisschollen festfriert und später durch Brandungsvorgänge mit losgerissen wird. Der dritte, innere Streifen wird durch die senkrecht auf die Küste zulaufenden, dunkelgrauen Drainagerinnen in unterschiedlich breite

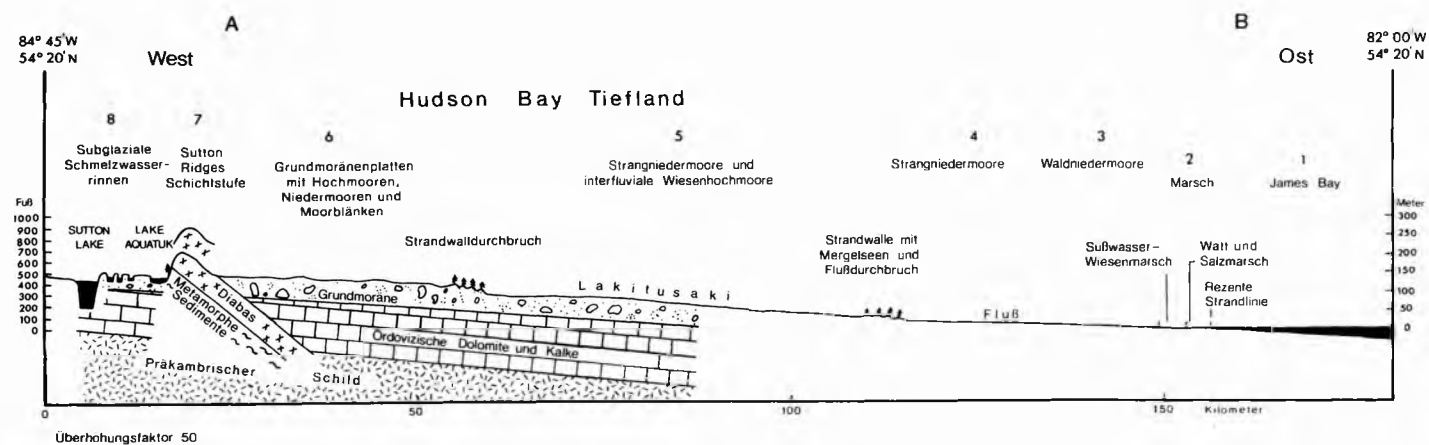


Fig. 2: Landschaftsgliederung entlang des Lakitusaki Rivers ($54^{\circ} 20' N$) von der James-Bay-Küste zum Sutton Lake; Lage des Profils A—B s. Fig. 1.



Bild 1: Küstenmarsch an der James Bay ca. 54° 20', 82° 30' W; CCRS Luftbild No. A 24482—89 vom Juni 1976.

Bänder aufgeteilt. Es ist die nicht mehr von der Flut erreichte Süßwasseralt- oder Wiesenmarsch. Der Verlauf der alten Küstenlinien ist noch deutlich in den küstenparallelen Linien nachzuweisen. Die dunklen Streifen entlang der autochthonen Wasserläufe lassen auf eine einsetzende Dickicht- oder Buschformation schließen. Permafrostmuster sind nicht erkennbar, da die Torfauflage noch zu gering für eine Abblockung des Bodenwärmestromes ist.

3.3 Waldniedermoore

Wenige Kilometer landeinwärts zeigt Bild 2 den Wechsel des Marschlandes in ein landüberziehendes, einförmiges, bewaldetes Niedermoor. Charakteristischer Baum ist die Lärche (*Larix laricina*; *Tamarack*), so daß man geradezu von einem „*Tamarack-Fen*“ sprechen kann. Der fleckige Marschcharakter paust sich stellenweise durch den noch sehr flachen Torf durch. Die Flüsse werden von Schwarzfichtengalerien gesäumt. Diese Galerien werden in der Literatur stellenweise mit einer eigenen Klasse „*Swamp*“ belegt. Sie besitzen eine scharfe Grenze zu den Niedermooren. Die Schwarzfichtengalerien sind aber auch schon als Torfplateaus zu interpretieren. Hierfür sprechen die hellen Flecken inmitten der Schwarzfichtensäume. Es sind kollabierte, baumfreie Teile, auf denen Sphagnen, Flechten und Labrador Tea ein höheres Reflexionsvermögen besitzen. Anzahl und Fläche der kollabierten Torfplateaus nimmt landeinwärts zu. Dies weist auf die zyklische Entwicklung von Palsen und Torfplateaus hin. Folgende Sequenz erscheint möglich: Ein Sphagnum-Kissen beginnt sich auf einer unmerklich besser drainierten Stelle, wie sie z. B. ein Hochuferabschnitt oder ein Niedermoorrand darstellen, zu entwickeln. Kleine Schwarzfichtenstämme siedeln sich auf ihnen an. Unter diesen Stämmen ist die Schneeakkumulation im Winter geringer, so daß das beginnende Hochmoor tiefer durchfriert. Die schattenwerfenden Bäume verzögern dann den Tauvorgang im Sommer bzw. verbrauchen die eingestrahlte Energie für ihre Transpiration. Permafrost läßt eine Palsa entstehen, durch die wiederum eine Verbesserung der Drainage erreicht wird und über weiteres Moos- und Baumwachstum ein Selbstverstärkungseffekt eintritt. Der Kulminationspunkt sind zusammengewachsene, bis zu 8 m hohe Torfplateaus. Die Degradation zum

Kollaps wird durch randliche Erosion (Regen, Wind) hervorgerufen, durch die die isolierende Torfschicht entfernt wird [BROWN 1973, p. 155]. Als charakteristischen Zeitraum für eine maximale *Peat Plateau*-Entwicklung nennen RAILTON & SPARLING [1973] 200 Jahre.

3.4 Strangniedermoore und Strandwallkomplexe

Mit zunehmender Entfernung von der Küste wächst auch die Torfmächtigkeit. Damit geht eine selektive Permafrostverstärkung in den Niedermooren einher. Das charakteristische Muster bilden ausgedehnte Strangniedermoore (*Bild 3*). Es ist noch immer ungeklärt, weshalb letztendlich die so augenfällige Gliederung dieses Niedermoorotyps in eher ombrotrophe, von Schwarzfichten bestandene, ca. 2 m hohe Torf-Stränge und minerotrophe, flache, wasserverfüllte Niedermoorblänken entsteht. In den Strängen steht Permafrost, die Mooreseen sind permafrostfrei.

Entlang der Flüsse fällt folgende Weiterentwicklung auf: Zwischen die Schwarzfichtengalerien und die Niedermoore hat sich eine Hochmoorzzone geschoben, die an der helleren, durch die Sphagnen hervorgerufenen Tönung und den ombrogenen Hochmoorblänken zu erkennen ist. Die Riffelung der Hochmooroberfläche läßt Palsaentwicklung vermuten. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Entwässerungsrichtung des Hochmoors auf das Niedermoor ausgerichtet ist. Das Hochmoor ist also asymmetrisch gebaut und hat seine Kulminationslinie in Flußnähe.

Im Westen wird das Niedermoor von neuen Texturen und Mustern begrenzt. Sie weisen auf veränderte ökologische Bedingungen hin! Es handelt sich um den ersten größeren, fossilen Strandwallkomplex (*Beach Ridges*) landeinwärts. Seine nord-südliche Erstreckung verläuft parallel zur heutigen Küstenlinie. Die Strandwälle bestehen aus einem Substrat von Grobsand und Geröll und bilden damit relativ trockene, gut drainierte, mineralreiche Standorte, selbst wenn sie nur wenige Meter über die Niedermoore hinausreichen. Die Pfeffer- und Salz-Textur ist charakteristisch für einen lichten Schwarzfichtenwald (*Woodland*) über flechtenbesetztem Untergrund. Zwischen den einzelnen Strandwällen werden kleine Seen aufgestaut. Sie heben sich mit ihrer helleren Wasserfarbe deutlich als Weißwasserseen von den Blänken des Hochmoors ab. Es sind sog. Mergelseen, d. h. aufgrund ihrer Lage inmitten der Strandwälle extrem minerotrophe Niedermoorblänken. Durch ihre Vegetation sind sie selbst im Satellitenbild leicht zu erkennen.

Der Lakitusaki River hat den Strandwallkomplex offenbar in Form eines Überlaufdurchbruchs zerschnitten. Die geringe Gefällserhöhung genügt zur Tiefenerosion und Anschneiden der Grundmoränenunterlage (*glacial till*). An den Talhängen stockt ein offener Wald, wobei für derartige mineralreiche, geschützte Standorte neben den Schwarzfichten (*Picea mariana*) auch Weißfichten (*Picea glauca*), Kiefern (*Pinus banksiana*) und Pappeln (*Populus* spp.) charakteristisch sind. Bei dem im Luftbild wiedergegebenen Flußabschnitt handelt es sich um rezentes Akkumulationsgebiet, kenntlich an den zahlreichen Totarmen, dem mäandrierenden Lauf und den hellen, vegetationslosen Sand- oder Schotterbänken.

3.5 Interfluviale Wiesenhochmoore

Flußaufwärts dieses Strandwallkomplexes schließt sich eine weitere Entwicklungsstufe an. Der Lakitusaki River hat hier eine junge Erosionsstrecke in der Grundmoränenaufgabe geschaffen (*Bild 4*). Sie ist an der schütterten Vegetation der zerrunten Talhänge und dem relativ gestreckten Flußlauf zu erkennen. Es ist auffallend, daß die drei parallel zum Lakitusaki River verlaufenden Gerinne kein derartiges Kerbtal geschaffen haben. Sie entwässern auch nicht in die James Bay, sondern in die Hudson Bay, so daß wir hier einen

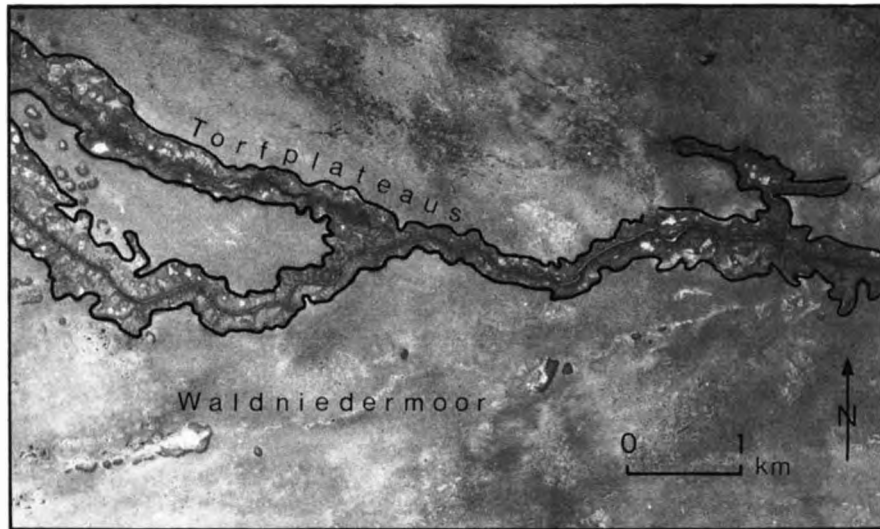


Bild 2: Waldniedermooere am Lakitusaki River westlich der Mündung in die James Bay ca. $54^{\circ} 25' N$, $82^{\circ} 50' W$; CCRS Luftbild No. A 24482—93 vom Juni 1976.



Bild 3: Strandwallkomplex im Strangniedermoorgebiet am Lakitusaki River ca. $54^{\circ} 20' N$, $83^{\circ} 20' W$; CCRS Luftbild No. A 24482—99 vom Juni 1976; Legende s. Bild 6.

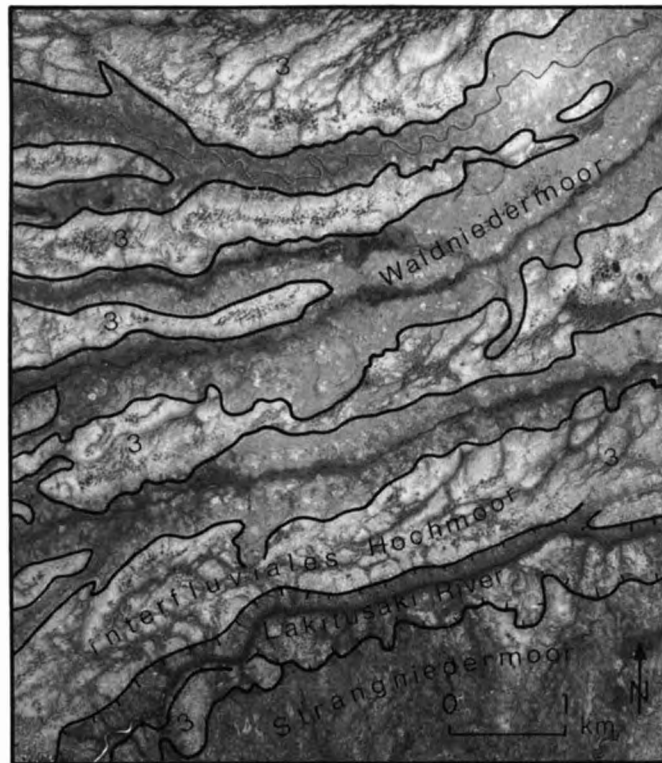


Bild 4: Interfluviale Wiesenhochmoore am Lakitusaki River ca. 54° 15' N, 83° 40' W; CCRS Luftbild No. A 24471 — 17 vom Juni 1976; Legende s. Bild 6.

Abschnitt der Hauptwasserscheide des Hudson/James-Bay-Tieflandes vor uns haben. Diese unterschiedliche Eintiefung erklärt sich aus der Tatsache, daß die Gerinne den oben genannten Strandwallkomplex nicht durchbrechen, sondern ihn nördlich umfließen. Aus der dadurch längeren Laufstrecke erklärt sich ihr geringeres Gefälle und damit die fehlende Energie zur Tiefenerosion. Auffallend sind die interfluvialen Wiesenhochmoore mit ihrem netzförmigen Entwässerungssystem, dessen Rillen von SJÖRS [1959] als „Seepages“ bezeichnet wurden. Der Flächenanteil der Niedermoore ist stark zurückgetreten. Insgesamt ist eine komplexe Mischung aus Hoch- und Niedermooren festzustellen.

3.6 Hochmoore, Niedermoore, Strandwälle und Seen im zentralen Tiefland

Mit Annäherung an die Sutton Ridges nimmt die physiographische Komplexität zu. Es dominiert eine scheinbar regellose Mischung von Hochmooren, Torfplateaus, Moorseen, Strandwällen mit Mergelseen und dazwischengeschalteten Niedermoordrainagerinnen (Bild 5). Dieses für das zentrale Tiefland charakteristische, komplexe Ökotopengefüge entwickelte sich in dem hier bereits relativ langen Zeitraum seit dem Rückzug der Tyrrell See. Wahrscheinlich gehen auch Einflüsse vom unterlagernden Grundmoränenmaterial und vom Anstehenden aus, worauf auch die große Anzahl von Strandwällen schließen

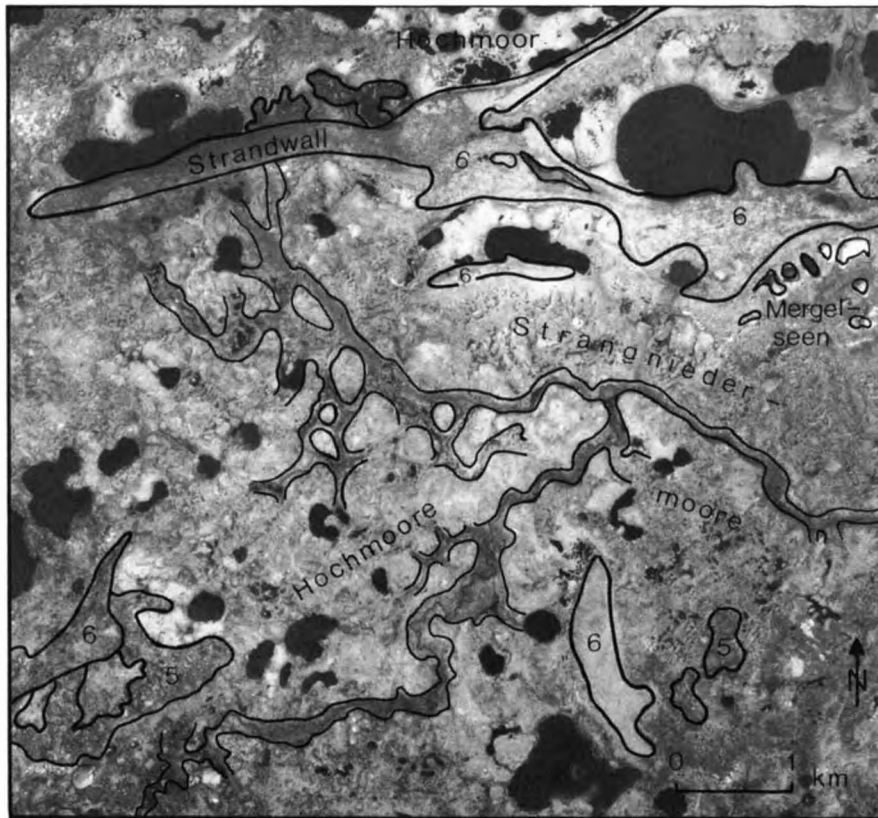


Bild 5: Hochmoore, Torfplateaus, Niedermoordrainagerinnen und Strandwälle am Kinushseo River südöstlich der Sutton Ridges ca. $54^{\circ} 20' \text{ N}$, $84^{\circ} 05' \text{ W}$; CCRS Luftbild No. A 24471–23 vom Juni 1976; Legende s. Bild 6.

läßt. Der nördlichste von ihnen zeichnet sich durch sehr helle Grauwerte ohne Sprenkelung aus. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf Vernichtung des Waldes durch Feuer, das eine wichtige Funktion für die Vegetationszusammensetzung ausübt. Weiter muß auf die große Zahl von Mergelseen in der Nähe der Strandwälle hingewiesen werden. Sie zeigen stark minerotrophe Bedingungen in der Nähe der Strandwälle an, sofern ein Grundwasserstrom von den Strandwällen ausgeht. Behindern dagegen Strandwälle einen derartigen Strom, so begünstigen sie damit die oligotrophen Sphagnum und die Bildung von Hochmooren, wie dies ebenfalls auf Bild 5 mehrfach zu beobachten ist.

3.7 Die Sutton Ridges

Die Sutton Ridges sind schräggestellte, nach Nordosten einfallende Blöcke metamorpher, präkambrischer Gesteine, die über dem kristallinen Sockel des Laurentischen Schildes aufragen. Sie bilden Teile der südwest-nordost streichenden, präkambrischen Cape-Henrietta-Maria-Antiklinale, die nicht nur das Hudson-vom Moose River-Sedimentationsbecken, sondern auch Hudson und James Bay voneinander trennt. Sie haben einen deutlichen, nach Südwesten gerichteten Steilabfall und bilden mit ihren hangenden, relativ harten magmatischen Gesteinen (Diorit, Diabase) und den liegenden, relativ weichen

metamorphen Sedimenten (Grauwacke, Tonschiefer) eine Schichtstufe. Die Sutton Ridges kulminieren in ca. 275 m und sind in einzelne Blöcke zerlegt, zwischen denen sich zahlreiche, meist in nord-südlicher Richtung gestreckte Seen befinden. Besonders zwei fallen durch ihre Breite und Länge auf: Sutton Lake und Hawley Lake. Nach BIRD [1980, p. 216] und CUMMING [1969, pp. 145 sq.] sollen sie Reste eines alten, Süd-Nord gerichteten tertiären Entwässerungssystems sein. Ein bis in die Rocky Mountains reichender Fluß müßte somit nach der Entfernung der ordovizischen Kalke und Dolomite einen epigenetischen Durchbruch durch die Sutton Ridges geschaffen haben. Allerdings darf man dieses Durchbruchstal nicht mit den rezenten Sutton Narrows, die Sutton und Hawley Lake trennen, verwechseln (*Bild 6*). Die schluchtartige Eintiefung der Sutton Narrows ist wohl durch mit der isostatischen, postglazialen Heraushebung schritthaltende Tiefenerosion antezedent zu erklären. Die Gipfel der Sutton Ridges dürften noch als kleine Inseln aus der Tyrrell See herausgeschaut haben, wie ein Höhenvergleich zwischen ihnen und den höchstgelegenen Strandwällen des Tieflandes ergibt. Die große Tiefe der genannten Seen — nach DOWLING (zit. bei CUMMING 1969, p. 145) soll der Boden des Sutton Lakes 94 m unter dem umgebenden Grundmoränenplateau liegen — kann nicht tertiärer Herkunft sein, da Hawley und Sutton Lake ein enges Kastental einnehmen. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß es sich hier um in Grundmoränenlehm eingetiefte subglaziale Schmelzwasser-rinnen handelt. Dies bedeutet aber eine Umkehrung der Fließrichtung im Vergleich zu einem eventuellen tertiären System, wobei das Überfließen der Sutton Ridges durch den hydrostatischen Druck problemlos zu erklären wäre. Es ist erstaunlich, daß die Transgression der Tyrrell See nicht zur Verschüttung der Seen führte. Während des langsamen Auftauchens bildete sich die rezente, nun wieder nach Norden gerichtete Entwässerungsrichtung entsprechend dem allgemeinen Einfallen des Laurentischen Schildes aus.

Bild 6 zeigt den südexponierten Steilabfall der Sutton Ridges mit den Sutton Narrows und dem Überlauf des Sutton Lake in den nördlich anschließenden Hawley Lake. Die Hochflächen der Diabas-Felsburgen sind aufgrund ihrer windexponierten Lage fast vegetationslos. Dagegen trägt die Hangschleppe der Schichtstufe geschlossenen Schwarzfichtenwald, der auch in den jungen, von den Ridges steil herabführenden Kerbtälchen zu finden ist. Die auf die Ridges aufgelagerten Strandwallreste zeigen den Höchststand der Tyrrell See vor dem Aufsteigen des Tieflandes an. Trocken und relativ mineralreich sind sie bevorzugte Standorte von Kiefern und Fichten. Brennen derartige Waldstücke aber ab, so sind Moose und Flechten die Pionierbesiedlung vor der Wiederbewaldung. Ihr hohes Reflexionsvermögen läßt sie als einheitlich helle Muster erkennbar werden. Die mittelgrauen Niedermoore besitzen dagegen eine gesprenkelte Struktur. Die dunklen Tupfen sind Schwarzfichteninseln, die sich auf Blockwerk oder allgemein auf höheren Grundmoränenakkumulationen entwickeln können. Sie zeigen immer eine geringmächtige Torfauf-lage von wenigen Dezimetern an. In den Schwarzfichteninseln wird man mit großer Wahrscheinlichkeit mit Permafrost rechnen können; auch sind zahlreiche Torfplateaus vorhanden. Die Felsbereiche dürften dagegen aufgrund der fehlenden Isolationsschicht und ihrer höheren Wärmekapazität permafrostfrei sein.

3.8 Die subglazialen Schmelzwasserrinnen im Gebiet der Sutton Ridges

Das Gebiet der Sutton Ridges wird noch durch ein weiteres, morphologisch interessantes Landschaftsmuster ausgezeichnet. Es handelt sich dabei um ca. 200—500 m breite und mehrere Kilometer lange Kastentäler. Sie sind z. T. von flachen, langgestreckten Seen erfüllt, die aber kleiner als Sutton und Hawley Lake dimensioniert sind. Das gesamte Ausmaß dieses teilweise kommunizierenden, NNE-SSW streichenden Kastentalsystems wird erst auf Satellitenbildern deutlich. Das geringe Reflexionsvermögen von Wasserflächen in den LANDSAT-Kanälen 6 und 7 und das deutliche Signal des auf den Talhängen stok-



LEGENDE

- | | |
|---|---------------------|
| 1 | Wasser |
| 2 | Fels |
| 3 | Hochmoor |
| 4 | Niedermoor |
| 5 | Torfplateau |
| 6 | Fossiler Strandwall |
| 7 | Grundmoräne |

0 1 2 3 km



Nr. 24482-57

CCRS

Luftbild

Bild 6: Die Schichtstufe der Sutton Ridges mit den Sutton Narrows zwischen Sutton Lake und Hawley Lake ca. 54° 25' N, 84° 40' W; CCRS Luftbild No. A 24482—57 vom Juni 1976.

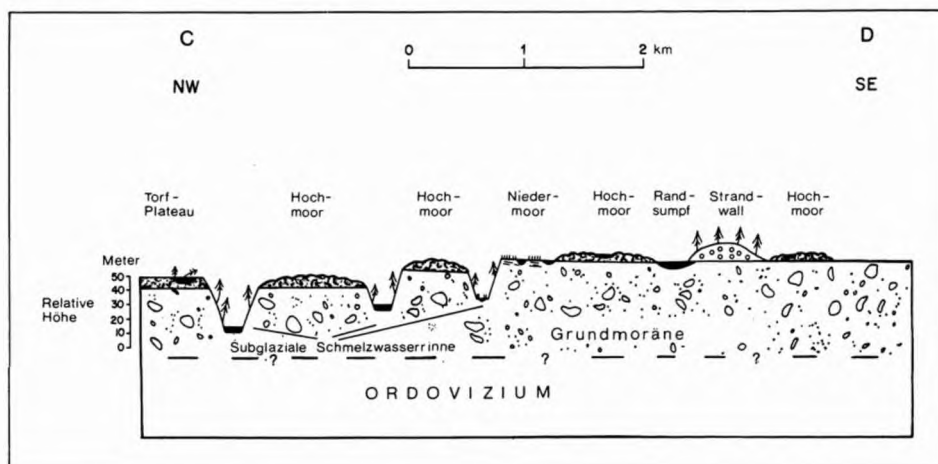


Bild 7: Die Rinnentäler am Süden des Sutton Lake ca. 54° 10' N, 84° 40' W; CCRS Luftbild No. A 24470—243 vom Juni 1976.

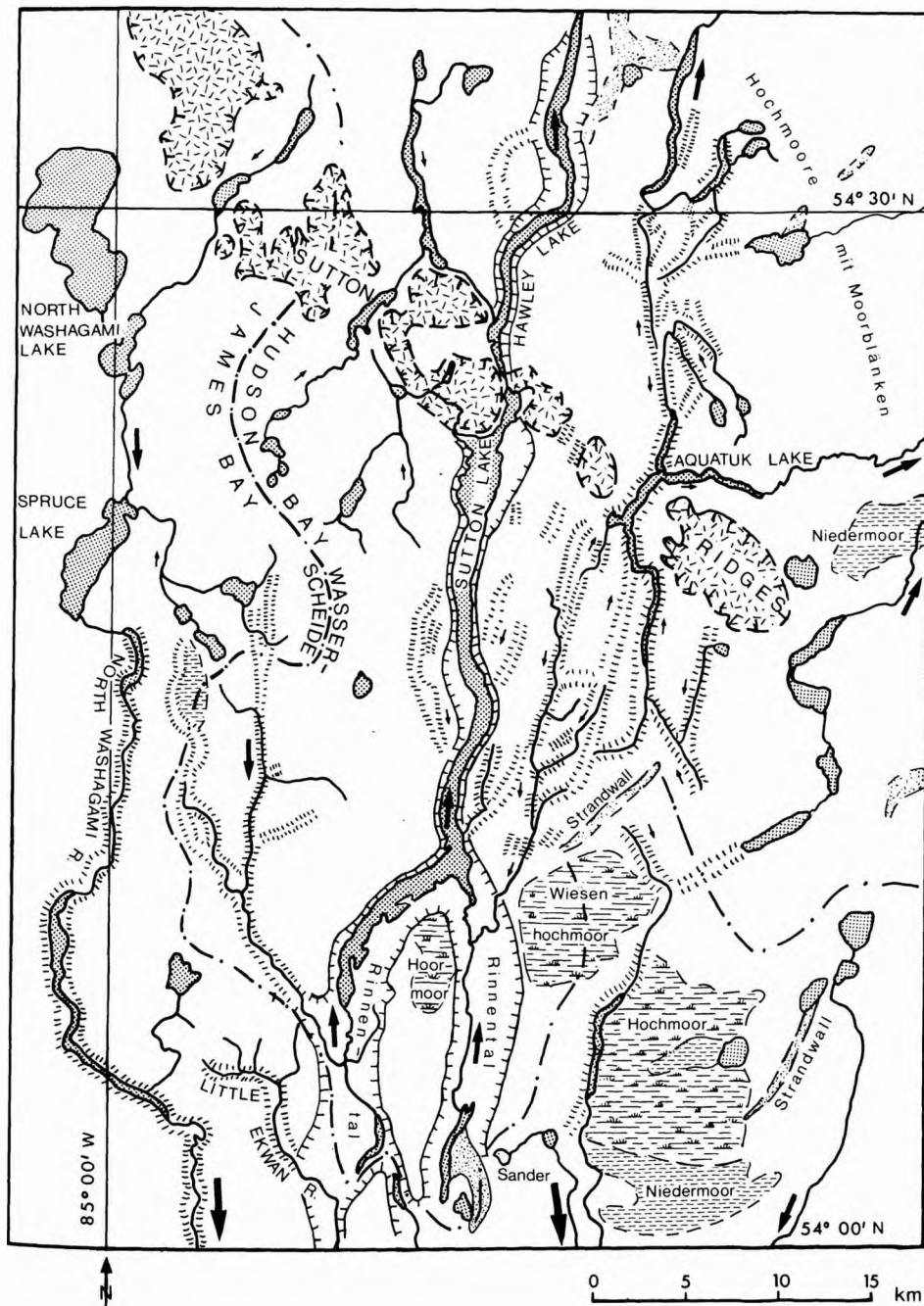


Fig. 3: Skizze der subglazialen Schmelzwasserrinnen und der hydrographischen Verhältnisse um den Sutton Lake (nach Top. Karte 1 : 250 000 Blatt 43 K und LANDSAT-Farbkomposite ca. 1 : 250 000 vom 2. Juli 1976).

kenden, lockeren Schwarzfichtenwaldes ermöglicht eine zusammenhängende Kartierung (Fig. 3). Der Umfang und die Streichrichtung des Kastentalsystems schließen eine Bildung nach dem Rückzug der Tyrrell See aus. Somit muß es sich also um ausgedehnte subglaziale Schmelzwasserrinnen handeln. Zwar können solche Formen an vielen Stellen des Tieflandes aufgrund des hydrographischen Netzes vermutet werden, seltener treten sie aber als morphologische Formen in derart klassischer Ausprägung auf. Ihre gute Konservierung dürfte mit der relativ großen Höhenlage im Bereich der Kap-Henrietta-Maria-Antiklinale und der daraus resultierenden, nur kurzzeitigen postglazialen Meeresbedeckung zu erklären sein. Die zerrunsten Talhänge bilden mit dem hohen Mineralgehalt des Grundmoränenlehms, mit der guten Drainage und mit dem Talverlauf quer zur Hauptwindrichtung ökologische Nischen und ermöglichen einen lockeren Schwarzfichtenwald mit Flechtenunterwuchs.

Das gesamte System der Rinnentäler ist nur ca. 20–30 m in das mit Hoch- und Niedermooren sowie Strandwällen besetzte Grundmoränenplateau eingetieft (Bild 7). Die Höhendifferenz von ca. 20 m zum Spiegel des Sutton Lakes als dem Vorfluterniveau hat eine rückschreitende Anzapfung der Rinnentäler zur Folge. Während in ihnen noch die subglaziale Entwässerungsrichtung nach Süden erhalten ist, entwässert der Sutton Lake über den Hawley Lake und den Sutton River in die Hudson Bay nach Norden. Die Hauptwasserscheide liegt somit nicht wie zu erwarten wäre an den Sutton Ridges, sondern in Form einer Talwasserscheide in der breiten Sutton-Schmelzwasserrinne wenige Kilometer südlich des Sees (Fig. 3). Der in die James Bay entwässernde Ekman River benutzt diese vorgegebene Entwässerungsleitlinie dann wieder in ihrer ursprünglichen Richtung.

4. Ökotopekartierung mit Hilfe von LANDSAT-Daten

Aus der vorangehenden Interpretation exemplarischer Landschaftsausschnitte geht hervor, daß trotz des großen Informationsgehalts von panchromatischen Luftbildern mit ihnen allein eine in jedem Fall eindeutige und flächendeckende Klassifizierung der Ökotopestruktur im Hudson-Bay-Tiefland noch nicht zu bewerkstelligen ist. Erst der multispektrale Informationsgehalt von Satellitenbildern und die digitale Auswertung der vier LANDSAT-Kanäle ermöglicht meistens eine klare Trennung zwischen den eingangs genannten Ökotope. Die physiographisch-ökologische Ausgliederung der dominierenden Ökotope bei punktuellen Geländeuntersuchungen, ihre Abgrenzung und Interferenz in verschiedenen Testgebieten mit Hilfe von Luftbildern und eine flächenhafte Kartierung anhand der Satellitendaten sind mit einander gekoppelte Arbeitsschritte.

4.1 Methodik der digitalen Ökotopekartierung

Die als Fig. 4 wiedergegebene Ökotopekarte vom Opinnagau Lake wurde mit dem „Ontario Centre for Remote Sensing Image Analysis System“ (OIAS) in Toronto durchgeführt. Das vierkanalige, in digitalen Bildelementen auf Magnetband gespeicherte LANDSAT-Bild wird in den Plattenspeicher des OIAS eingelesen. Die Daten des betreffenden Landschaftsausschnittes werden einer geometrischen Korrektur unterworfen, so daß eine spätere Ausgabe in einem gewählten Kartenmaßstab paßgenau möglich ist. Hierfür wird die Bildszene auf den Bildschirm gespielt, besonders gut zu identifizierende Bildpunkte mehrfach vergrößert und ihre Bildkoordination mit Hilfe eines Lichtschreibers bestimmt. Die UTM-Gitterkoordinaten dieser Punkte werden einer großmaßstäbigen Karte entnommen und den Bildkoordinaten zugeordnet. Je nach Größe der Bildszene und der Reliefkomplexität werden zur Umrechnung aller Bildelemente auf das UTM-Gitternetz ca. 30–50 derartige Paßpunkte eingespeist. Als Klassifizierungsprogramm steht im OIAS die

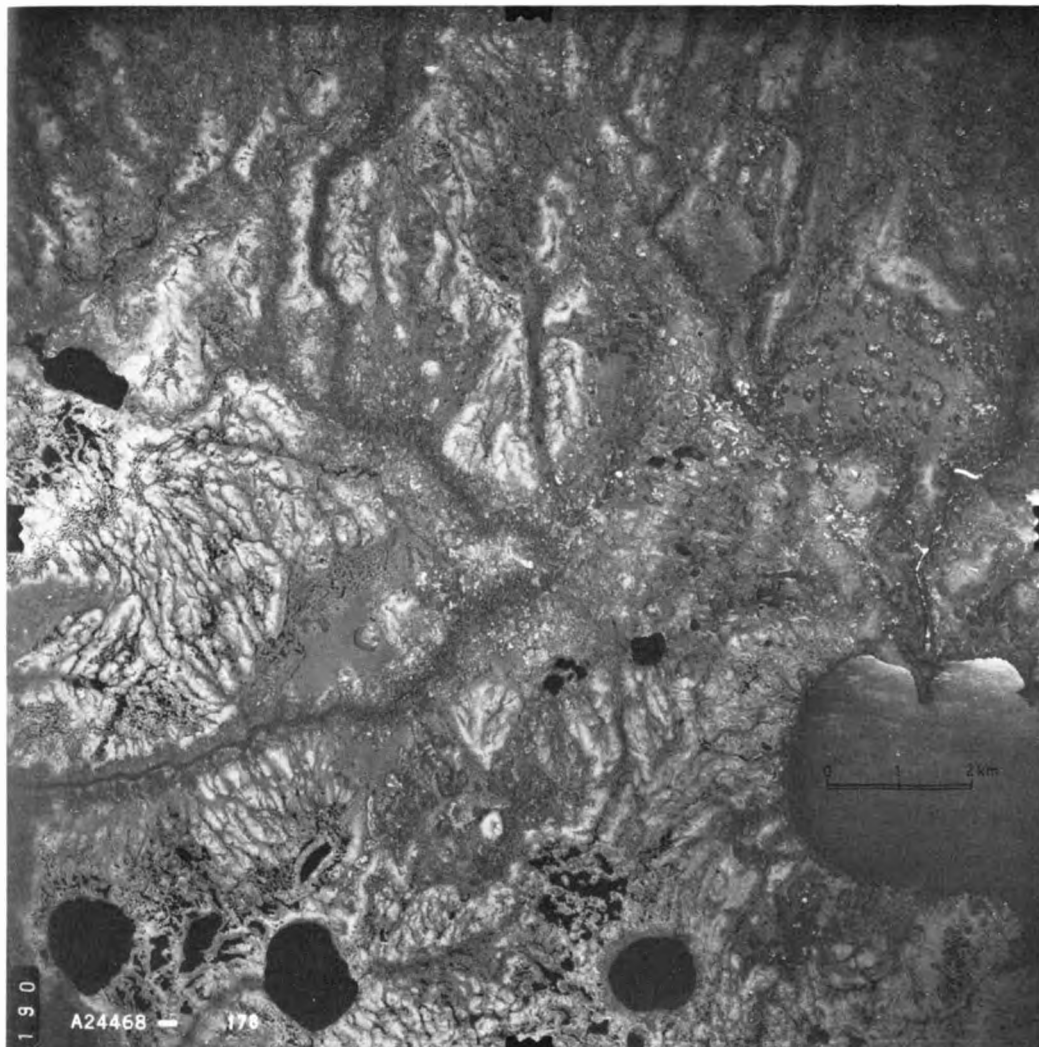


Bild 8: Ökotopengefüge westlich des Opinnagau Lake im Luftbild zum Vergleich mit der digitalen Karte Fig. 4, östliche Hälfte; ca. 53° 55' N, 84° 35' W.

„*Supervised-Maximum-Likelihood-Method*“ zur Verfügung. Als wichtiger Verarbeitungsschritt werden dabei interaktiv am Bildschirm Trainingsgebiete ausgezeichnet und dem OIAS als Lernfeld für eine bestimmte Ökotope-Klasse mitgeteilt. Die Festlegung dieser Trainingsgebiete geschieht unter Heranziehung von Luftbildern und eventuell vorhandenen Bodeninventuren, so daß mit größtmöglicher Genauigkeit eine bestimmte, spektral einheitliche Signatur auch einem bestimmten Ökotope zuzuordnen ist. Je sorgfältiger und detaillierter diese Trainingsflächen festgelegt werden, um so exakter wird die spätere Klassifizierung ausfallen. Hier liegt auch eine erste Problematik bei der Bildauswertung, wobei Fehlinterpretationen bei der Lernfeldbestimmung mit zunehmender Erfahrung des Experimentators geringer werden. Die Anzahl der Klassen wird je nach physiographischer Komplexität wechseln. Für die vorliegende Klassifizierung wurden 12 Klassen ausgewählt, die für die Kartendarstellung aber zu 9 Klassen zusammengelegt wurden. Das OIAS ordnet nun nach der größtmöglichen Wahrscheinlichkeit Bildelement für Bildelement in die vorgegebenen Klassen ein. Wiederholte Vergleiche der Klassifizierungsergebnisse mit der LANDSAT-Farbkomposite, den Luftbildern und der Karteninformation gestatten dem Experimentator eine qualitative Bewertung und eventuelle Abänderung der Klassifizierung. Weitere Bildverarbeitungsschritte wie die Entfernung singulärer Bildelemente oder die Festlegung von Mindestflächengrößen für die Kartenwiedergabe dienen der Generalisierung.

Am Schluß steht die kartographische Darstellung der Klassifizierungsergebnisse. Die einzelnen Klassen der Bildszene werden mit Farben belegt, einer Legende versehen und in den gewünschten Kartenmaßstab umgerechnet. Die Ausgabe erfolgt über einen Periphercomputer am „*Applicon Color Plotting System*“ nach dem Prinzip des „*Ink-Jet-Printing*“ [KUHN & MYERS 1979]. Die graphische Information wird dabei digital gesteuert durch mikroskopisch feine Farbstrahlen in den Primärfarben magenta, gelb und cyan auf einen Papierbogen gesprüht. Innerhalb weniger Minuten kann man die fertige Karte mit eventuell einigen Millionen von Bildelementen von der Trommel nehmen.

4.2 Das Gebiet des Opinnagau Lake in der digitalen Ökotopekarte

Mit der ausschnittsweise vorgestellten Karte vom Gebiet des Opinnagau Lake und den Karten, die PALA & BOISSONNEAU [1981] vom Gebiet des Albany River angefertigt haben, liegen erste Landnutzungsklassifikationen aus dem Hudson-Bay-Tiefland vor. Das kartierte und auf das UTM-Gitternetz entzerrte Gebiet schließt sich im Süden an die oben beschriebenen subglazialen Schmelzwasserrinnen des Sutton Lake an. Zum Vergleich ist ein entsprechender Luftbildausschnitt von der südöstlichen Kartenecke (*Bild 8*) dargestellt worden. Die breiten, NNW-SSE verlaufenden Fichtenwaldstreifen zeigen gut drainierte Standorte an. Es ist dies die südliche Fortsetzung des Sutton-Lake-Schmelzwasserrinnen-Systems. Die großflächigen Waldareale in der Bildmitte stellten sich im Geländetest sogar als Sanderakkumulationen (*outwash*) heraus. Um den Opinnagau Lake dominieren sonst aber die Feucht-Ökotope in Form der Wald- und Wiesenhochmoore. Bei letzteren konnten noch die Untergruppen der Strang- und Blänken-Hochmoore unterschieden werden. Niedermoore treten dagegen nur vereinzelt auf. Die Torfplateaus beweisen, daß bereits mit sporadischem Permafrost gerechnet werden muß. Charakteristisch sind auch die im Gegensatz zu den Schmelzwasserrinnen sehr schmalen Schwarzfichtengalerien entlang der Flüsse, wie z. B. am North Washagami River in der linken Bildhälfte. Vereinzelt sind auch Gebüschformationen auszumachen. Zusammen betrachtet stellt das kartierte Gebiet ein typisches Beispiel des Ökotope mosaiks im zentralen Tiefland dar.

5. Ausblick und Kritik der digitalen Satellitenbilddauswertung

Die digitale Auswertung multispektraler Satellitendaten steht noch am Anfang ihrer Möglichkeiten. Trotzdem ist aber klar, daß sie in einer derart unzugänglichen und weiträumigen Landschaft, wie sie das Hudson-Bay-Tiefland darstellt, ein unverzichtbares Hilfsmittel für die Landschaftsökologie darstellt. Nachdem sowohl die geometrische Entzerrung der Satellitenbilder als auch die Wiedergabe der Ergebnisse in Kartenform gelöst ist, wird nun an einer weiteren Verkürzung der Rechenzeiten, der Erhöhung der Speicherkapazität und der Überlagerung verschiedener Informationsebenen gearbeitet. Probleme treten zum einen noch bei der Festlegung der Trainingsgebiete auf. Werden hier dem Rechner nur wenige falsche Bildelemente vorgegeben, so erhöht sich sofort die Fehlerquote bei der sich anschließenden Klassifizierung. Je besser die Geländekenntnis des Experimentators im Trainingsgebiet ist, um so genauer wird auch die Computerklassifizierung sein. Fehlbeurteilungen treten dann auf, wenn verschiedene Ökotope mit dem gleichen Vegetationsmuster bestanden sind, wie dies z. B. bei Strandwällen und Waldhochmooren der Fall sein kann. Auch hier zeichnen sich aber Lösungsmöglichkeiten ab, indem z. B. anhand einer vorausgehenden Luftbildinterpretation bereits alle Strandwälle ausgeschieden und als Vorinformation dem Rechner mitgeteilt werden. Die Frage einer zu groben Bildelementgröße von $56 \times 79 \text{ m}^2$ ist für kanadische Größenverhältnisse weniger relevant als für mitteleuropäische. Die Bildauflösung wird außerdem mit dem vorgesehenen Start von LANDSAT-D im Sommer 1982 auf ca. 30 m verbessert werden.

Eine flächendeckende Ökopenklassifikation des gesamten Hudson/James-Bay-Tieflandes im Maßstab 1 : 250 000 und damit ein beträchtlicher Gewinn für das Verständnis des ökologischen Beziehungsgefüges an der nordhemisphärischen Waldgrenze ist in den Bereich des Möglichen gerückt.

Literatur

- BIRD, J. B. 1980: The Natural Landscapes of Canada. 2nd ed. — Toronto etc.
- BOSTOCK, H. H. 1969: Precambrian Sedimentary Rocks of the Hudson Bay Lowlands. — Pp. 206—214 in: Earth Science Symp. on Hudson Bay. — Ottawa. — Geol. Survey of Canada, Paper. 68—53.
- BROWN, R. J. E. 1973: Permafrost-distribution and relation to environmental factors in the Hudson Bay Lowland. — Pp. 35—68 in: Proc. Symp. Physical. Environment of the Hudson Bay Lowland. Univ. Guelph, March 30—31, 1973. — Guelph.
- BROWN, R. J. E. 1977: Muskeg and Permafrost. — Pp. 148—163 in: Muskeg and the Northern Environment in Canada. Ed. by N. W. RADFORTH & C. O. BRAWNER. — Toronto, Buffalo.
- CHAPMAN, L. J., & M. K. THOMAS 1968: The Climate of Northern Ontario, Canada. — Dept. of Transport, Meteorol. Branch, Climatological Studies. 6 (1968), pp. 1—58.
- COOMBS, D. B. 1954: The Physiographic Subdivisions of the Hudson Bay Lowlands South of 60 Degrees North. — Geographical Bull., Ottawa. 6 (1954), pp. 1—16.
- CRAIG, B. G. 1969: Late-Glacial and Postglacial History of the Hudson Bay Region. — Pp. 63—77 in: Earth Science Symp. on Hudson Bay. — Ottawa. — Geol. Survey of Canada, Paper 68—53.
- CUMMING, L. M. 1969: Rivers of the Hudson Bay Lowlands. — Pp. 144—164 in: Earth Science Symp. on Hudson Bay. — Ottawa. — Geol. Survey of Canada, Paper 68—53.
- HARE, F. K. 1950: Climate and zonal divisions of the boreal forest formation in eastern Canada. — Geogr. Rev. 40 (1950), pp. 615—635.
- HARE, F. K. 1954: The boreal conifer zone. — Geogr. Studies, London. 1 (1954), pp. 4—18.
- HUSTICH, I. 1957: On the phytogeography of the subarctic Hudson Bay Lowland. — Acta Geogr. Fenn. 16 (1957), pp. 1—48.
- JEGLUM, J. K., A. N. BOISSONNEAU & V. F. HAAVISTO 1974: Toward a Wetland Classification for Ontario. — Sault Ste. Marie. — Great Lakes Forest Research Centre Sault Ste. Marie, Information Report 0—X—215, Canadian Forestry Service, Departm. of the Environment, Dec. 1974.

- KOZLOVIC, N. J., & P. J. HOWARTH 1977: Biophysical Mapping in Northwestern Ontario from Aircraft and Satellite Remote Sensing Data. 4th Canad. Symp. on Remote Sensing, May 16—18, 1977. — Quebec. Pp. 27—36.
- KUHN, L., & R. A. MYERS 1979: Ink-Jet Printing. — *Scientific American*. **240** (1979), pp. 162—178.
- PALA, S., & A. BOISSONNEAU 1981: Production of Wetland Classification Maps for the Hudson Bay/James Bay Lowlands. — Guelph. — Proc. Hudson/James Bay Symp., Univ. of Guelph, April 28—30, 1981.
- PALA, S., & W. WEISCHET 1981: A Model for the Physiographic Analysis of the Hudson Bay/James Bay Lowlands. — Guelph. — Proc. Hudson/James Bay Symp., Univ. of Guelph, April 28—30, 1981.
- RADFORTH, N. W. 1969: Classification of muskeg. — In: *Muskeg Engineering Handbook*, ed. by I. C. FARLANE. — Toronto.
- RADFORTH, N. W., & C. O. BRAUNER (Eds.) 1977: *Muskeg and the Northern Environment in Canada*. — Toronto, Buffalo.
- RAILTON, J. B., & J. H. SPARLING 1973: Preliminary studies on the ecology of palsa mounds in northern Ontario. — *Canad. J. Botany*. **51** (1973), pp. 1037—1044.
- RILEY, J. 1981 a: The Flora of the Hudson Bay Lowland. — Guelph. — Proc. Hudson/James Bay Symp., Guelph, April 28—30, 1981.
- RILEY, J. 1981 b: Provisional Wetland Classification for the Hudson Bay Lowland and the Major Regional Themes. Parks and Recreation Section, Ontario Ministry of Natural Resources, Northern Region. — Cochrane (Ontario).
- SHILTS, W. 1981: Quaternary Evolution of the Hudson/James Bay Region. — Guelph. — Proc. Hudson/James Bay Symp., Guelph, April 28—30, 1981.
- SIMS, R. A., & G. M. WICKWARE 1981: Using Vegetational Physiognomy to Classify Treed Peatlands Near Southern James Bay, Ontario. — Guelph. — Proc. Hudson/James Bay Symp., Guelph, April 28—30, 1981.
- SJÖRS, H. 1959: Bogs and Fens in the Hudson Bay Lowlands. — *Arctic*. **12** (1959), pp. 1—19.
- SJÖRS, H. 1961: Oberflächenmuster in den borealen Torfgebieten. — *Endeavour*. **20** (1961), pp. 217—224.
- SJÖRS, H. 1963: Bogs and Fens on Attawapiskat River, Northern Ontario. — *National Museum of Canada. Bull.* **186** (1963), pp. 45—133.
- THIE, J. 1976: An Evaluation of Remote Sensing Techniques for Ecological (Biophysical) Land Classification in Northern Canada. — Petawawa. — Proc. 1st. Meeting Canad. Comm. on Ecological (Bio-physical) Land Classification. Petawawa, May 25—28, 1976. Pp. 129—147.
- ZOLTAI, S. C. 1973: Vegetation, surficial deposits and permafrost relationships in the Hudson Bay Lowlands. — Guelph. — Proc. Symp. on the Physical Environment of the Hudson Bay Lowland, Guelph, March 30—31, 1973. Pp. 17—34.