

# **Charakteristik und spektrale Eigenschaften periglazialer Landschaften im Lena-Delta, NO-Sibirien**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Geograph

Eingereicht von: Mathias Ulrich

Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Heinrich (Universität Leipzig)  
Dr. Lutz Schirrmeister (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und  
Meeresforschung, Forschungsstelle Potsdam)

Juni 2006

### **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit verzeichneten Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Leipzig, Juni 2006

Mathias Ulrich

# Inhaltsverzeichnis

I.	Zusammenfassung .....	III
II.	Abbildungsverzeichnis .....	V
III.	Tabellenverzeichnis .....	VII
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
<b>1.</b>	<b>Einleitung und Fragestellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1.	Charakterisierung des Periglazial .....	3
2.2.	Geomorphologie und periglaziale Prozesse in arktischen Tundragebieten .....	4
2.2.1.	Permafrost.....	4
2.2.2.	Thermokarst.....	6
2.2.3.	Polygone und Eiskeilbildung .....	8
2.2.4.	Weitere periglaziale Prozesse und Formen .....	9
2.3.	Vegetation und Böden der Tundrazone .....	10
2.3.1.	Vegetationsgeographische Charakteristiken.....	10
2.3.2.	Bodenkundliche Charakteristiken.....	12
2.4.	Fernerkundung und Spektrometrie .....	13
2.4.1.	Einleitung .....	13
2.4.2.	Elektromagnetische Strahlung und atmosphärische Effekte.....	13
2.4.3.	Reflexion und spektrale Signaturen von Oberflächen.....	15
2.4.4.	Fernerkundungssysteme und –verfahren .....	17
2.4.5.	Feldspektrometrie .....	18
<b>3.</b>	<b>Untersuchungsgebiet</b> .....	<b>20</b>
3.1.	Das Lena-Delta (geographische Lage) .....	20
3.1.1.	Klimatische, vegetationskundliche und allgemeine pedologische Bedingungen.....	21
3.1.2.	Geomorphologische und geologische Charakterisierung .....	23
3.2.	Arga Komplex (Hauptuntersuchungsgebiet) .....	27
<b>4.</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>30</b>
4.1.	Felduntersuchungen .....	30
4.1.1.	Feldspektrometrie .....	30
4.1.2.	Geomorphologische Geländebeschreibungen und pedologische Kartierungen.....	33

---

4.2.	GIS-Analysen.....	33
4.3.	Verarbeitung von Fernerkundungsdaten .....	34
4.3.1.	Datenmaterial.....	34
4.3.2.	Klassifikation der Satellitendaten .....	34
4.4.	Verarbeitung der Feldspektrometriedaten .....	36
4.4.1.	Spektrale Bibliotheken .....	36
4.4.2.	Continuum Removal.....	37
4.4.3.	Klassifikation der Feldspektren .....	38
4.5.	Weitere verwendete Daten .....	38
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>39</b>
5.1.	Ergebnis der Feldspektrometrie.....	39
5.1.1.	Klassifikation und Auswertung der Feldspektren .....	39
5.1.2.	Bewertung signifikanter Absorptionsbereiche der Feldspektren nach Anwendung eines <i>continuum removal</i> .....	57
5.2.	Ergebnis der geomorphologischen Kartierung.....	60
5.3.	Ergebnis der Landsat-7 basierten Maximum-Likelihood Klassifikation.....	61
5.3.1.	Klassifikationsergebnis.....	61
5.3.2.	Verbreitung der Klassen auf den geomorphologischen Haupteinheiten.....	64
5.3.3.	Fehlerbetrachtung und Bewertung der Klassifikation.....	66
5.4.	Ergebnis der pedologischen Felduntersuchungen.....	67
<b>6.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>70</b>
6.1.	Charakterisierung periglazialer Strukturen und geomorphologischer Oberflächentypen anhand feldspektraler Signaturen.....	70
6.2.	Geomorphologische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes anhand der Landsat-7 ETM+ Oberflächenklassifikation .....	78
6.3.	Vergleich der Feldspektrometrie- und Landsat-7 Satellitendaten .....	82
<b>7.</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>84</b>
<b>8.</b>	<b>Ausblick und Anregung für Folgeuntersuchungen</b> .....	<b>85</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>87</b>
<b>Anhang</b>	.....	<b>96</b>
	Anhang 1: Messstandorte der Feldspektrometrie	
	Anhang 2: Standorte der geomorphologischen Geländebeschreibungen	
	Anhang 3: Protokolle der Bodenprofile	



## I. Zusammenfassung

Für die Interpretation multi- und hyperspektraler Fernerkundungsdaten arktischer Permafrostgebiete sind detaillierte Felddaten zu Vegetation, Geomorphologie, Böden und spektralen Oberflächeneigenschaften erforderlich. Ein ASD FieldSpec<sup>®</sup>FR wurde im Sommer 2005 genutzt, um spektrale Daten verschiedener periglazialer Oberflächen im Lena Delta (NO-Sibirien) zu erfassen.

Das Lena Delta wird von 500 bis 600m mächtigen kontinuierlichem Permafrost unterlagert und ist durch Tundravegetation geprägt.

Feuchte Tundragebiete in Periglaziallandschaften werden im globalen Kohlenstoffkreislauf als wichtige Kohlenstoffsinken betrachtet und haben als mögliche Methan-Quellen in Szenarien der Klimaveränderung große Bedeutung. Sich verändernde Umweltparameter, zum Beispiel die Zunahme der saisonalen Auftauschicht (*active layer*) führt zu deutlichen Änderungen in den Vegetationsgesellschaften und somit auch der spektralen Eigenschaften der Pflanzendecke.

Das Lena Delta stellt als Grenze zwischen sibirischer Landmasse und der Laptev-See ein besonders sensibles Ökosystem dar und gilt als ein Schlüsselobjekt in der Erforschung periglazialer Landschaften. Es wird in drei geomorphologische Hauptterrassen untergliedert, die sich deutlich in ihren lithologischen, geokryologischen sowie hydrologischen Eigenschaften unterscheiden. Aktive Deltabereiche sowie holozäne sandige Ablagerungen bilden die erste Hauptterrasse. Die zweite Hauptterrasse (Arga Komplex) stellt mit ihren fluvialen Sandablagerungen eine Besonderheit in der Geomorphologie des Lena Deltas dar. Die Entstehung ist bis heute weitestgehend ungeklärt. Die dritte Hauptterrasse ist geprägt durch spätpleistozäne sandige Sedimente, die von sehr eisreichen, organischen Ablagerungen, dem so genannten Eiskomplex überlagert werden.

In Abhängigkeit von verschiedenen Geländeparametern wie Hydrologie, Boden sowie Geomorphologie bilden sich verschiedene Vegetationsgesellschaften, die sich auch anhand ihrer spektralen Daten unterscheiden lassen. Im Sommer 2005 wurden im Rahmen dieser Arbeit typische Landschaftselemente im nordwestlichen Lena-Delta detailliert untersucht. Mit einem portablen Feldspektrometer wurden Punkt- und Profilmessungen durchgeführt sowie bodenkundliche Eigenschaften, geomorphologische Situation und Pflanzengesellschaften beschrieben und kartiert. Das Ziel der Arbeit ist die Klassifizierung verschiedener geomorphologischer Strukturen anhand von Satelliten- und Feldspektrometerdaten.

Unter Berücksichtigung der spektralen Felddaten, der Klassifikation eines LANDSAT-7 ETM+ Bildauschnittes und von GIS-basierten Analysen konnten verschiedene periglaziale

Oberflächen sowie geomorphologische Strukturen im nordwestlichen Lena-Delta unterschieden werden.

Die Feldspektrometrie bietet als *ground truth* Methode eine ausgezeichnete Möglichkeit zum *upscaling* von Felddaten und zur Validierung von Fernerkundungsdaten.

Mit der Erfassung typischer Landschaftsparameter und der spektralen Charakteristiken verschiedenster Oberflächen im Untersuchungsgebiet steht erstmals ein solcher Datensatz für das Lena-Delta zur Verfügung. Dieser ermöglicht den direkten Vergleich mit anderen periglazialen Tundragebieten und kann für die Validierung der Fernerkundungsdaten vergleichbarer Periglazialregionen verwendet werden.

# I Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Verbreitung verschiedener periglazialer Zonen und des Permafrosts in der nördlichen Hemisphäre .....	4
Abb. 2:	Temperaturkurve und vertikale Gliederung des Permafrosts. (1) Saisonale Auftauzone (active layer). (2) Thermoaktive Schicht, Zone saisonaler Volumen- und Temperaturschwankungen, Breitenwachstum der Eiskeile. (3) Isothermer Permafrost, keine frostwechsel-dynamischen Prozesse. (4) Niefrostbereich .....	5
Abb. 3:	Laterale Permafrostdegradation im Lena-Delta (NO-Sibirien) <i>Links:</i> Zerstörung der Polygonstruktur, <i>Rechts:</i> V-förmiges Thermoerosionstal mit zahlreichen Thermokarsthügeln .....	7
Abb. 4:	<i>Links:</i> Eiskeilbildung schematisch nach der Frostkontraktionstheorie <i>Rechts:</i> orientierte, orthogonale Low-Centre Polygone mit Polygontümpeln im Lena-Delta (NO-Sibirien).....	8
Abb. 5:	Gliederung der Tundra nach dem Bedeckungsgrad .....	11
Abb. 6:	Das elektromagnetische Spektrum mit Darstellung der atmosphärischen Fenster, der Strahlungsenergie der Sonne sowie die Bereiche verschiedener Fernerkundungssensoren.....	15
Abb. 7:	Spektrale Signaturen von grüner Vegetation, vegetationsfreiem Boden (Sand) und Wasser. Grafik zusammengestellt aus eigenen Daten. Bereiche atmosphärischer Störung zwischen 1350 - 1415 nm und 1800 - 1970 nm wurden entfernt. ....	16
Abb. 8:	Lage des Lena-Deltas und Hauptuntersuchungsgebietes (rote Box) mit Untersuchungsstandorten (gelbe Punkte), Landsat-7 ETM+ Satellitenbilder .	20
Abb. 9:	Klimatische Information für das Lena-Delta, 30-jähriges Mittel (1961-1990) für Tiksi (71,9°N; 128,9°O) .....	21
Abb. 10:	Geomorphologische Gliederung und Hauptkanäle des Lena-Deltas .....	24
Abb. 11:	Digitales Geländemodell des Hauptuntersuchungsgebietes.....	27
Abb. 12:	Oberfläche und typische Thermokarstseen des Arga Komplexes .....	29
Abb. 13:	Schema der Methoden, Arbeitsschritte und verwendete Daten innerhalb der vorliegenden Diplomarbeit .....	30
Abb. 14:	Nutzung des FieldSpec <sup>®</sup> FR im Lena-Delta (August 2005). Referenzmessung mit einer Weißreferenztafel (Spectralon <sup>®</sup> ) (im Bild unten) 31	
Abb. 15:	<i>Links:</i> Darstellung der Spektren und Absorptionseigenschaften grüner Vegetation (rote Linie) und trockener Vegetation (schwarze Linie), sowie vereinfachte Darstellung des Kontinuums (blaue Linie) über das gesamte Spektrum grüner Vegetation. Spektren zusammengestellt aus USGS Spectral Library <i>Rechts:</i> Gesamtes Spektrum der grünen Vegetation nach einem continuum removal. Erklärung im Text.....	37
Abb. 16:	Spektrale Signatur der Klasse I.....	39
Abb. 17:	Spektrale Signatur der Klasse II.....	40
Abb. 18:	Oberfläche der 3.Terrasse (Klasse I) .....	41
Abb. 19:	Alassenke der 3.Terrasse mit zahlreichen Thermokarsthügeln (Klasse II) .....	41
Abb. 20:	Spektrale Signaturen der Klasse III.....	42
Abb. 21:	Spektrale Signaturen der Klasse IV .....	43

Abb. 22:	Polygonale Tundra der 2.Terrasse (Klasse III), <i>Links</i> : Standort T010, <i>Rechts</i> : Standort T050 .....	44
Abb. 23:	Sandflächen der 2.Terrasse (Klasse IV), <i>Links</i> : Standort T048, <i>Rechts</i> : Standort T008 .....	44
Abb. 24:	Spektrale Signatur der Klasse V .....	45
Abb. 25:	Spektrale Signaturen der Klasse VI .....	46
Abb. 26:	Alaswälle der 2.Terrasse (Klasse V) .....	47
Abb. 27:	Alassenken der 2.Terrasse (Klasse VI), <i>Links</i> : Standort T051a, <i>Rechts</i> : Standort T019 .....	47
Abb. 28:	Spektrale Signatur der Klasse VII .....	48
Abb. 29:	Versumpfter Flachwasserbereich eines verlandenden Alassees (Klasse VII) .....	49
Abb. 30:	Spektrale Signatur der Klasse VIII .....	49
Abb. 31:	Spektrale Signaturen der Klasse IX .....	50
Abb. 32:	Schwemmhohlsäume begrenzen den Auenbereich der 1.Terrasse (Klasse VIII).....	51
Abb. 33:	Oberstes Akkumulationsniveau, Oberfläche der 1.Terrasse (Klasse IX), <i>Links/Rechts</i> : Standort Sam2.....	51
Abb. 34:	Spektrale Signaturen der Klasse X .....	52
Abb. 35:	Höhere Überflutungsniveaus der 1.Terrasse (Klasse X), <i>Oben</i> : Standort T053a, <i>Unten</i> : Standort T053b.....	53
Abb. 36:	Spektrale Signaturen der Klasse XI .....	54
Abb. 37:	Spektrale Signatur der Klasse XII .....	55
Abb. 38:	Auen und niedere Überflutungsbereiche der 1.Terrasse (Klasse XI), <i>Links</i> : Standort Sam4, <i>Rechts</i> : Standort T011a .....	56
Abb. 39:	Auen der 1.Terrasse, Vegetationsbedeckung wird dominiert von <i>Arctophylla sp.</i> (Klasse XII).....	56
Abb. 40:	Vergleich der Chlorophyllabsorptionen aller Klassen nach Anwendung eines <i>continuum removal</i> .....	57
Abb. 41:	Vergleich der Wasserabsorptionen aller Klassen nach Anwendung eines <i>continuum removal</i> .....	59
Abb. 42:	Geomorphologische Karte des Hauptuntersuchungsgebietes, kartiert mit Hilfe des DGM und eigenen Felderkundungen. Im Hintergrund ein panchromatisches Corona-Satellitenbild.....	60
Abb. 43:	Ergebnis der überwachten Maximum-Likelihood Klassifikation für das Hauptuntersuchungsgebiet auf der Basis eines Landsat-7 ETM+ Bildausschnittes (Aufnahmedatum: 26.07.2001, Auflösung: 30 x 30m). Die rote Box markiert das Hauptuntersuchungsgebiet .....	63
Abb. 44:	Prozentualer Anteil der Landsat-7 basierten Klassen an der Gesamtfläche des Hauptuntersuchungsgebietes. Der Wert in Klammern gibt die Flächengröße an. ....	64
Abb. 45:	Prozentuale Flächenanteile der Oberflächenklassen bezogen auf die geomorphologischen Einheiten des Lena-Deltas und die Thermokarstsenken innerhalb des Untersuchungsgebietes.....	66

Abb. 46:	Bodenkarte für eine Thermokarstsenke der Insel Turakh-Sise auf der Basis eines CHRIS/PROBA Satellitenbildes (Aufnahmedatum: Juni 2005, räumliche Auflösung: 17 x 17m, spektrale Auflösung: 18 Kanäle 438 – 1035nm) .....	69
Abb. 47:	Gesamtübersicht zu den spektralen Signaturen der einzelnen Feldspektrometrieklassen. Nähere Beschreibungen und genauere Darstellungen siehe Kap.5.1.1. ....	72
Abb. 48:	Veränderung der spektralen Signatur einer Oberfläche durch die phänologische Alterung der Vegetationsbedeckung am gleichen Standort (Ebe-Basyn-Sise, episodischer Überflutungsbereich, Messung: T009, T053, s. Anhang 1) .....	76
Abb. 49:	Die spektralen Signaturen des Polygonwalls und des Polygonzentrums weisen auf die messbaren sehr kleinräumigen Unterschiede in Tundralandschaften hin (Messstandort T010, s. Anhang 1) .....	76

## II Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Technische Daten, Spektralkanäle und Auflösung verschiedener Aufnahmesysteme .....	19
Tab. 2:	Gesamtfläche des Hauptuntersuchungsgebietes und Flächenanteile der kartierten geomorphologischen Einheiten .....	60
Tab. 3:	Auflistung der Klassen nach einer Maximum-Likelihood Klassifikation eines Landsat-7 Bildausschnittes, der Oberflächencharakteristiken sowie der dazugehörigen Standortbezeichnungen der geomorphologischen Felderkundungen .....	62
Tab. 4:	Zusammenfassende Übersicht und Auflistung der Feldspektrometrieklassen nach den geomorphologischen Deltaterrassen und Oberflächencharakteristiken .....	71

### III Abkürzungsverzeichnis

ASD	Analytical Spectral Devices
Abb.	Abbildung
AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung
Bez.	Bezeichnung
BP	<i>before present</i> , vor heute
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
DGM	digitales Geländemodell
d.h.	das heißt
engl.	englisch
ESA	European Space Agency
et al.	und weitere Autoren
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem
Kap.	Kapitel
max.	maximal
min	Minute(n)
NIR	<i>near infrared range</i> , Bereich des nahen Infrarots
S.	Seite
Sec.	Sekunde
s.	siehe
s.o.	siehe oben
SWIR	<i>short wave infrared range</i> , Bereich des kurzwelligen Infrarots
Tab.	Tabelle
TIR	<i>thermal infrared range</i> , Bereich des thermischen Infrarots
u.a.	unter anderen / und andere
vgl.	vergleiche
VIS	<i>visible</i> , sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums
yakut.	Yakutisch
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung und Fragestellung

Arktische periglaziale Tundragebiete sind sensible Ökosysteme und unterliegen einem stetigen Wandel. Permafrost unterlagert große Teile dieser Gebiete und ist ein entscheidender beeinflussender Faktor periglazialer Prozesse. Er reagiert sensibel auf lokale und regionale Klimaschwankungen. Die Beobachtung arktischer Permafrostgebiete und periglazialer Prozesse ist somit besonders im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel von Bedeutung.

Das Lena-Delta im Nordosten Sibiriens ist das größte arktische Delta. Es wird von kontinuierlichem Permafrost unterlagert mit Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern (GRIGORIEV 1993). Periglaziale Prozesse und Erscheinungsformen, wie Thermokarst, Pingos, Eiskeilpolygone und weitere Frostmusterstrukturen, prägen das Bild der weiten flachen Tundralandschaft. Die geomorphologische Entwicklung des Deltas innerhalb der Laptev-See wird bis heute kontrovers diskutiert. Das Lena-Delta wird untergliedert in drei geomorphologische Terrassen. Diese unterscheiden sich deutlich in ihren lithologischen, geokryologischen und hydrologischen Eigenschaften sowie in der Ausprägung geomorphologischer Strukturen und den damit verbundenen Pflanzengesellschaften. Torf- und Moorböden mit teils enormen Organikanreicherungen sind in der feuchten Polygonlandschaft des Deltas weit verbreitet. Das Lena-Delta gilt als Schlüsselregion bei der Erforschung periglazialer von Permafrost unterlagerter Ökosysteme (RACHOLD & GRIGORIEV 2003).

Zur großräumigen Beobachtung und Erfassung des Deltas und arktischer Gebiete hat sich besonders die hyper- und multispektrale Fernerkundung als nützlich erwiesen. Zur Interpretation und Analyse von Fernerkundungsdaten sind detaillierte Felderkundungen nötig. Besonders die spektralen Eigenschaften verschiedener Oberflächen sind dabei von Bedeutung. In Abhängigkeit von der Geländesituation, d.h. hydrologischen, pedologischen und geomorphologischen Bedingungen bilden sich spezifische Pflanzengesellschaften, die sich in ihren spektralen Signaturen unterscheiden lassen. Die Erfassung dieser Signaturen bietet Informationen zu verschiedensten Oberflächenbedingungen wie Art und Zustand der Vegetationsbedeckung oder der Bodenfeuchte. In diesem Kontext wurden räumlich sowie spektral hoch auflösende Sensoren wie tragbare Feldspektrometer entwickelt, die es möglich machen spektrale Eigenschaften direkt im Gelände zu messen. In Kombination mit Geoinformationssystemen (GIS) und der Analyse von Satellitenbildern kann dies verwendet werden, um verschiedenste periglaziale Strukturen und geomorphologische Oberflächentypen des Lena-Deltas zu charakterisieren und zu klassifizieren. Die Klassifikationsergebnisse können auf weitere arktische Tundragebiete übertragen werden. Sie bieten des Weiteren die Möglichkeit, Stoff- und Energieflüsse zu

bilanzieren oder Veränderungen innerhalb der periglazialen Landschaften detailliert zu erfassen.

Bis heute gibt es nur wenige Felduntersuchungen zu spektralen Eigenschaften periglazialer Oberflächen in Tundragebieten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden detaillierte spektrale Feldmessungen verschiedener Oberflächenformen und periglazialer Strukturen im Lena-Delta durchgeführt. Parallel dazu wurde die geomorphologische Situation dokumentiert. In Kombination mit Fernerkundungsdaten und GIS-Analysen soll dies zur Klassifikation und Charakterisierung verschiedener geomorphologischer Strukturen führen sowie die Validierung multispektraler Satellitendaten ermöglichen. In diesem Zusammenhang wurden folgende zentrale Fragen und Aufgabenstellungen bearbeitet:

- Wie ist die Verbreitung, Form und Struktur typischer periglazialer Oberflächen des westlichen Lena-Deltas?
- Ist es möglich, verschiedene Oberflächen- und Relieftypen anhand individueller spektraler Eigenschaften zu charakterisieren und zu klassifizieren?
- Sind LANDSAT 7 ETM+ Satellitendaten und weitere Fernerkundungsdaten geeignet, um geomorphologische Strukturen, Oberflächen und Bodentypen des Lena-Deltas zu unterscheiden?
- Ist der Vergleich mit vorhandenen Satellitenbildklassifikationen des Lena-Deltas möglich? Gibt es starke Abweichungen zu eigenen Feldbefunden und Klassifikationen?



## 2. Grundlagen

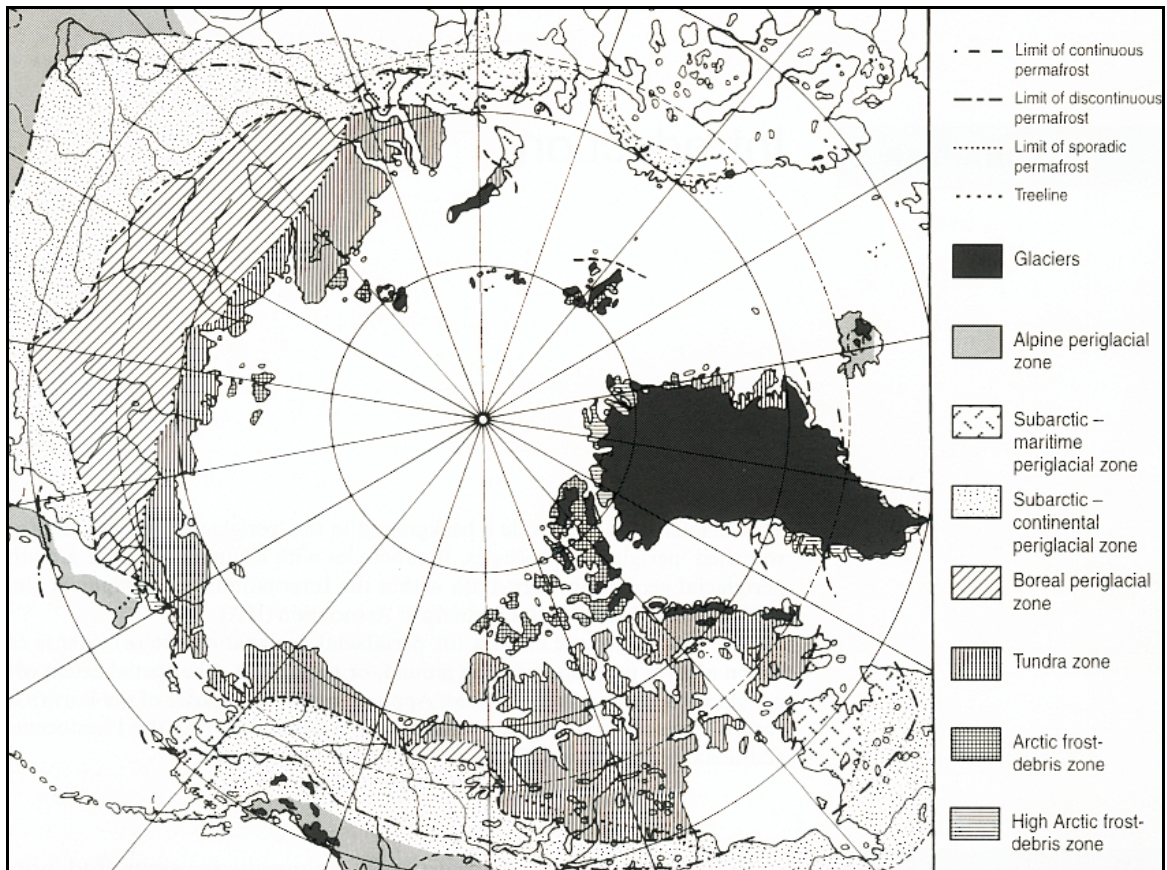
### 2.1. Charakterisierung des Periglazial

Der Begriff „Periglazial“ bedeutet im wörtlichen Sinne „Umkreis des Eises, Umland der Gletscher“. Ursprünglich wurden damit die klimatische und geomorphologische Situation in den eisfreien Gebieten im Vorfeld der pleistozänen Eisschilde beschrieben (LOZINSKI 1912).

In der modernen Literatur wird der Begriff für sämtliche Bedingungen, Prozesse und Oberflächenformen verwendet, die im Zusammenhang mit kalten, nicht-glazialen Regionen stehen. Alle Periglazialgebiete werden von Frostprozessen dominiert, in vielen herrscht auch Permafrost vor (EVERDINGEN 2005, FRENCH 2000).

Entsprechend der modernen Definition wird der Begriff auch im Rahmen dieser Arbeit weniger im klimatischen Sinne verstanden (vgl. DAVIES 1969), sondern in Anlehnung an FRENCH (1996), WASHBURN (1979) und WEISE (1983) u.a. als Oberbegriff für charakteristische geomorphologische Prozesse und Oberflächenformen. Diese sind verbunden mit kalt-klimatischen Verhältnissen. Permafrost ist allerdings kein bedingender Faktor für alle periglazialen Prozesse. Das Periglazial wird also eher durch den Formenschatz als durch klimatische Schwellenwerte begrenzt (WEISE 1983). FRENCH (1996) unterscheidet verschiedene periglaziale Zonen in der nördlichen Hemisphäre (Abb.1). Deren Verbreitung basiert auf dem Vorkommen von spezifischen mikromorphologischen Formen und deren klimatischen Grenzen. Unterschieden werden polare Wüsten und Halbwüsten der hohen Arktis, die Tundrazone, die boreale Zone, die subarktische kontinentale und subarktische ozeanische Zone sowie die alpine Zone.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden nur einige periglaziale Prozesse und Phänomene der arktischen Tundrazone mit direkter Relevanz für die Studie beschrieben. Ausführliche Übersichten zu diesem Thema bieten unter anderen BLÜMEL 1999, DAVIES 1969, FRENCH 1996, KARTE 1979, WASHBURN 1979, WEISE 1983.



**Abb. 1:** Verbreitung verschiedener periglazialer Zonen und des Permafrosts in der nördlichen Hemisphäre (aus FRENCH 1996, nach KARTE 1979)

## 2.2. Geomorphologie und periglaziale Prozesse in arktischen Tundragebieten

### 2.2.1. Permafrost

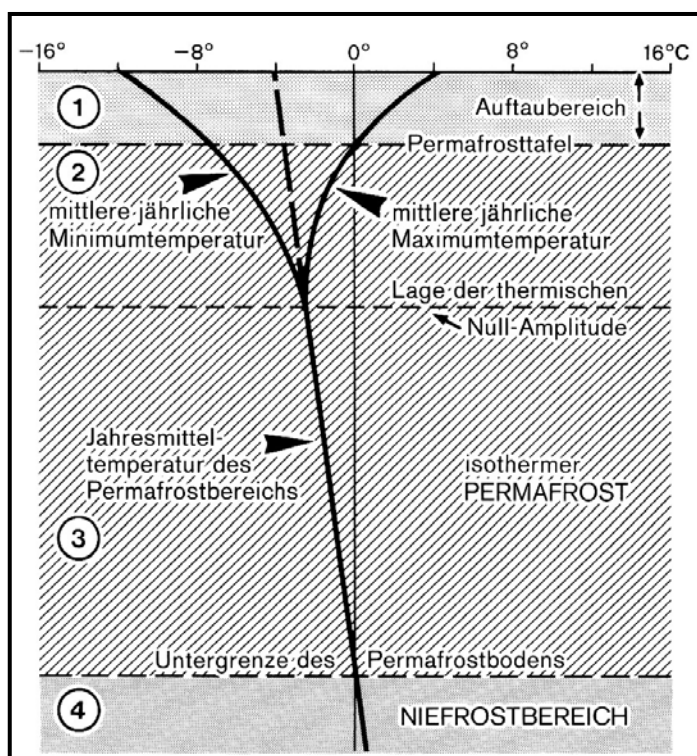
Eine Reihe geomorphologischer Prozesse und Oberflächenstrukturen in periglazialen Tundragebieten sind verbunden mit Permafrost.

Permafrost (Dauerfrostboden) bezeichnet gefrorenen Untergrund dessen Temperatur für mindestens zwei aufeinander folgende Jahre unter  $0^{\circ}\text{C}$  verbleibt (EVERDINGEN 2005). Permafrost ist ein primäres Produkt kalter Klimate und unterlagert nahezu 24% der Landoberfläche der nördlichen Hemisphäre (ZHANG et.al. 1999).

Seine Verbreitung nimmt mit der geographischen Breite ab. ZHANG et al. (1999) unterscheiden je nach Prozentsatz der von Dauerfrostboden im Untergrund eingenommen wird, kontinuierlichen (90 - 100%), diskontinuierlichen (50 - 90%), sporadischen (10 - 50%) und isolierten (0 - 10%) Permafrost. Zirkumpolare Regionen werden von kontinuierlichem Permafrost dominiert (s. Abb.1). Als Verbreitungsgrenze gilt eine mittlere Jahrestemperatur der Luft von  $-8^{\circ}\text{C}$  (FRENCH 1999). Als südliche Grenze des

diskontinuierlichen Permafrosts wird eine mittlere Jahrestemperatur der Luft von  $-3^{\circ}\text{C}$  bis  $-4^{\circ}\text{C}$  angegeben. Für das Auftreten sporadischer Permafrostinseln gilt eine mittlere Jahrestemperatur von  $-1^{\circ}\text{C}$  als Grenzwert (BLÜMEL 1999, WEISE 1983). Die Mächtigkeiten des Dauerfrostbodens variieren von wenigen Metern bis über 1000m. Die Existenz von tiefen und mächtigen Permafrost ist ein Beweis für schon seit langem anhaltende kalte Klimabedingungen einer Region (FRENCH 1999). Neben den überregionalen Faktoren wird die Verbreitung und Mächtigkeit von Permafrost durch verschiedene lokale Landschaftsfaktoren beeinflusst wie z.B. Mikroklima, Hangneigung, Vegetation, Schneebedeckung sowie Typ, Textur und Feuchtigkeit des Untergrundes.

Der Permafrost wird von einer saisonalen Auftauzone überlagert (s. Abb.2). Diese wird durch die gleichen überregionalen und lokalen Umweltfaktoren beeinflusst wie der Dauerfrostboden. Der sommerliche Auftaubereich nimmt generell in Richtung des Äquators zu. Nach FRENCH (1974) stellt besonders die Vegetationsbedeckung durch Isolationseffekte den wichtigsten Einfluss auf das Temperaturregime der Auftauzone dar. Außerdem beeinflussen Exposition als auch das Relief und damit verbundene Einstrahlungsverhältnisse sowie verschiedene Sedimente durch spezifische Wärmeleitfähigkeiten die Mächtigkeiten der jährlichen Auftauzone und des Permafrosts. Die tiefsten Auftauzonen mit bis zu 2 - 3 Metern findet man in der Regel in subarktischen Gebieten oder in grobkörnigen Sedimenten, z.B. Sanddünen. Die geringsten Auftautiefen mit wenigen Zentimetern sind in hochpolaren Regionen oder unter Sphagnum-Vegetation zu finden (FRENCH 1996, WALKER 1998).



**Abb. 2:** Temperaturkurve und vertikale Gliederung des Permafrosts. (1) Saisonale Auftauzone (active layer). (2) Thermoaktive Schicht, Zone saisonaler Volumen- und Temperaturschwankungen, Breitenwachstum der Eiskeile. (3) Isothermer Permafrost, keine frostwechself-dynamischen Prozesse. (4) Niefrostbereich (aus BLÜMEL 1999, nach KARTE 1979)

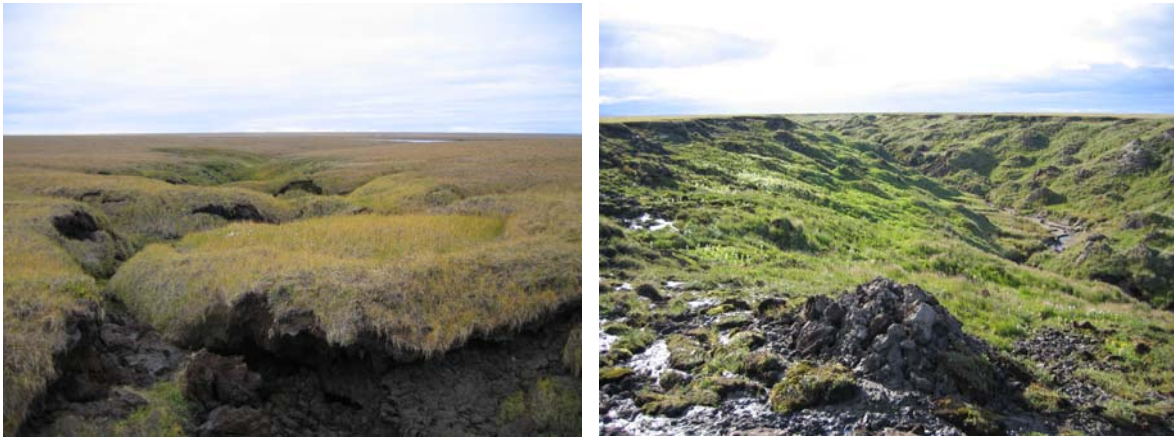
In der Auftauzone geschehen die meisten Frostwirkungsprozesse wie Kryoturbation und Solifluktion sowie physikalische Verwitterung und Bodenbildung. Chemische und biologische Verwitterung sind in periglazialen Gebieten auf Grund der anhaltend niedrigen Temperaturen geringer ausgeprägt (z.B. FRENCH 1996, WASHBURN 1979).

Permafrost reagiert sensibel auf längerfristige klimatische Schwankungen insbesondere auf Klimaerwärmungen. Der Auf- und Abbau von Permafrost sowie die Mächtigkeit der saisonalen Auftauzone werden durch das thermische Regime des Untergrundes und der Oberfläche kontrolliert (WASHBURN 1979, WEISE 1983).

### 2.2.2. Thermokarst

Unter Thermokarst versteht man sowohl den Prozess des Abschmelzens massiver Grundeiskörper und der Degradation von Permafrost als auch die dabei entstehenden charakteristischen Oberflächenformen (EVERDINGEN 2005, SOLOVIEV 1973). Thermokarst tritt vor allem in den arktischen Tiefländern und den dort vorkommenden eisreichen Feinsedimenten auf. Thermokarst entsteht durch die Störung des thermischen Gleichgewichts in der oberen Permafrostzone und durch die Vertiefung der Auftauzone (CZUDEK & DEMEK 1970). Diese Permafrostzerstörung kann regional-klimatischen Ursprungs sein oder lokal durch sich verändernde Oberflächenbedingungen der Hydrologie und Vegetation gesteuert werden (FRENCH 1974). Thermokarst ist ein sich selbst verstärkender Prozess. Das heißt, wenn die Permafrostdegradation (Permafrostabbau) erst einmal begonnen hat, wird sie vor allem durch stehendes Wasser und den Verlust der isolierenden Vegetationsdecke verstärkt. Eine entscheidende Rolle spielt hier die höhere Wärmeleitfähigkeit von Wasser gegenüber Eis oder trockenen Sedimenten (WEISE 1983).

Nach CZUDEK & DEMEK (1970) werden laterale Permafrostdegradation und vertikale Permafrostdegradation unterschieden. Laterale Permafrostdegradation vollzieht sich hauptsächlich durch Thermoerosion und Thermoabrasion an Fluss- und Seeufern sowie an Meeresküsten. Fließendes Wasser verstärkt die Erosion häufig entlang von Eiskeilpolygonen, die sich oberhalb von Steilhängen befinden. Dabei wird die vorhandene *low-centre* Polygonstruktur zerstört (Abb.3), und es entstehen *high-centre* Polygone (siehe auch Kap. 2.2.3). Mit zunehmender Erosion und der damit verbundenen Zerstörung der Vegetation entstehen aus den Sedimenten der Polygonzentren konische Hügel (Thermokarsthügel). Diese können über 8m hoch und/oder 2 - 3m im Durchmesser sein (FRENCH 1974). Laterale Permafrostdegradation kann zu einer exzessiven subparallelen Zurückverlagerung von Steilhängen führen (ROMANOVSKII et al. 2000). Im Zusammenhang mit fließendem Wasser bilden sich in den sehr eisreichen Ablagerungen Nord Sibiriens typische U- oder V-förmige Thermoerosionstäler (Abb.3).



**Abb. 3:** Laterale Permafrostdegradation im Lena-Delta (NO-Sibirien) *Links:* Zerstörung der Polygonstruktur, *Rechts:* V-förmiges Thermoerosionstal mit zahlreichen Thermokarsthügeln

Bei vertikaler Permafrostdegradation durch Thermokarst kommt es zum Abbau des Grundeises und zur Subsidenz der Oberfläche. Dies geschieht vor allem in relativ ebenen Gebieten, deren Sedimente mit Eis übersättigt sind (YERSHOV 1998). Dabei spielt der Eisgehalt eine entscheidende Rolle, da sich die Oberfläche nur so weit einsenken kann, wie sich das Sediment setzt. Es kommt zur Entstehung von ausgedehnten Depressionen. Runde bis ovale Thermokarstdepressionen mit steilen Hängen und flachen grasbedecktem Boden werden als *Alas* (yakut.) bezeichnet (SOLOVIEV 1973). Die Ausdehnung dieser Depressionen kann mehrere Kilometer betragen. Ein Großteil der Strukturen ist während des postglazialen Wärmeoptimums (8500–4000 BP) entstanden (FRENCH 1974). Thermokarst steht eng in Beziehung mit Seen in den neu entstandenen Senken, da Wasserkörper Degradations- und Absenkungsprozesse verstärken. Häufig befinden sich die flachen, in einigen Regionen stark längsorientierten Thermokarstseen im Zentrum großer Thermokarstsenken. Zur Ursache der See-Orientierung gibt es zahlreiche Theorien (vgl. MORGENSTERN 2005). Die meisten Autoren gehen davon aus, dass vorherrschende Windrichtungen bei der Seenenstehung eine wichtige Rolle für die Herausbildung einer Orientierung spielen (z.B. CARSON 2001).

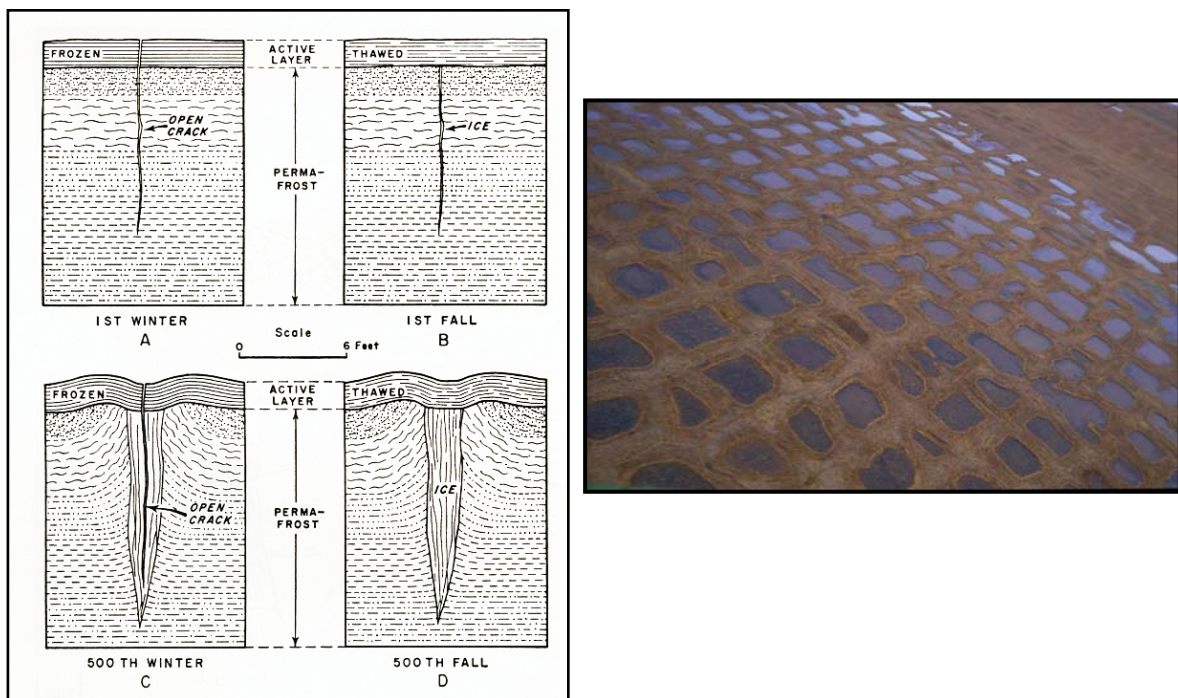
Geophysikalische Untersuchungen haben gezeigt, dass sich unter den Seen ungefrorene Sedimentkörper befinden (SCHWAMBORN et al. 2000). Diese Horizonte oder Körper ungefrorenen Bodens im Permafrost werden als Taliks bezeichnet (EVERDINGEN 2005).

Nach CZUDEK & DEMEK (1970) und ROMANOVSKII et.al. (2000) u.a. verläuft der Prozess der Alasentwicklung zyklisch. Nach der Senkung der Oberfläche und der Seebildung wird die Depression mit Sedimenten verfüllt. Der Thermokarstsee verlandet oder drainiert. Der Talik im Untergrund gefriert erneut und Permafrostaggradation (Permafrostaufbau) findet statt.



### 2.2.3. Polygone und Eiskeilbildung

Eiskeilbildung ist ein charakteristisches Merkmal periglazialer Tundragebiete. Diese keilförmigen Eiskörper können maximal mehrere Meter breit und mehrere Dekameter tief sein und bilden polygonale Netze, die an der Geländeoberfläche sichtbar sind. Das Auftreten von Eiskeilen ist von klimatischer und paläoklimatischer Signifikanz, da die Bildung nur im Permafrost und bei Lufttemperaturen deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  geschieht (FRENCH 1996). Grundlage der Bildung von Eiskeilen ist das Aufreißen von Frostspalten im Boden. Dies wird durch Frost induzierte Sedimentkontraktion bei Temperaturen deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  verursacht (Abb.4) (LACHENBRUCH 1966). Die Spalten bilden im Grundriss polygonale Muster. Sie sind zunächst nur einige Millimeter breit. Während der Schneeschmelze werden die Frostspalten mit Wasser und/oder Sediment verfüllt, welches im Permafrostboden sofort gefriert und somit eine initiale Eisader bildet. Auf Grund der Volumenzunahme von Eis um 9% gegenüber Wasser wird die Spalte verbreitert. Im darauf folgenden Winter reißt der Boden an dieser angelegten Schwachstelle erneut auf. Folge dieses mehrjährigen sich wiederholenden Prozesses ist die Entstehung von Eiskeilen, die sich lamellenartig aus zahlreichen Eisadern zusammensetzen. Man unterscheidet syngenetischer von epigenetischer Eiskeilbildung. Die Erstgenannte beschreibt die Entstehung während der Akkumulation von Sedimenten, die Zweite die Entwicklung nach der Sedimentation auf einer stabilen Oberfläche (FRENCH 1996, WEISE 1983).



**Abb. 4:** Links: Eiskeilbildung schematisch nach der Frostkontraktionstheorie (aus LACHENBRUCH 1966), Rechts: orientierte, orthogonale low-centre Polygone mit Polygontümpeln im Lena-Delta (NO-Sibirien)

Eiskeilbildung führt je nach Homogenität des Materials und häufig in Anlehnung an bestimmte Geländeleitlinien wie Gewässerläufe zur Entwicklung von unregelmäßigen oder orientierten orthogonalen bis hexagonalen Polygonnetzen (s. Abb.4) (FRENCH 1996, KARTE 1979, LACHENBRUCH 1966). Der Durchmesser der Polygone kann einige Meter bis mehrere Dekameter betragen. Allgemein können *high-centre* von *low-centre* Polygonen unterschieden werden. Typisch für *low-centre* Polygone sind Polygonwälle, die ein tiefer liegendes, meist versumpftes Polygonzentrum umgeben. Durch thermale Expansion im Sommer dehnt sich der Sedimentkörper im Polygonzentrum aus und schiebt einen Wall an den Polygonrändern über den Eiskeilen auf (MACKAY 1980). *Low-centre* Polygone sind charakteristisch für flache, sumpfige Gebiete. Die Wälle können bis zu einem Meter hoch sein. Die Drainage erfolgt in Richtung der Zentren. Häufig sind diese auch mit Wasser gefüllt. Durch die hydrologische Situation kommt es in *low-centre* Polygonen oftmals zur Entstehung von initialem Thermokarst. Als Folge davon können die Eiskeile austauen und zum Zusammenschluss vieler kleiner Polygontümpel führen. Mit verstärkter Drainage des Polygonzentrums und einer Zunahme der Auftauzone oberhalb der Eiskeile können *high-centre* Polygone entstehen. Durch Zunahme des Vegetationswachstums und einem damit verbundenen Aufwachsen sowie dem Verschwinden der Feuchtvegetation kommt es zur Erhöhung des Polygonzentrums (FRENCH 1996).

Eiskeilpolygone können nach bestimmten Charakteristiken wie Polygongröße, Form, Mikrorelief, Exposition, Vegetationsbedeckung, Bodentyp, hydrologischer Situation sowie der Tiefe der sommerlichen Auftauzone und dem Wachstum der Eiskeile unterschieden werden.

#### **2.2.4. Weitere periglaziale Prozesse und Formen**

Ein in Tundraböden häufig zu beobachtender Prozess ist Kryoturbation. Dieser Oberbegriff bezeichnet eine frostbedingte Materialsortierung und -durchmischung. Dabei sind Frostwirkungsprozesse insbesondere kryostatischer Druck während des Gefrierens des Materials sowie intergranularer Druck während des Tauens von Bedeutung (WASHBURN 1979). Die durch das unterschiedliche Einfrieren entstandenen Spannungen und Drücke werden durch Massenverlagerungen ausgeglichen. Die Folge ist zum einen die Zerstörung und Durchmischung der Bodenhorizonte und -strukturen sowie die Entstehung so genannter Würgeböden (WEISE 1983). An der Oberfläche kommt es zur Bildung von Frostmusterstrukturen wie Beulen, Ringe, Polygone, Streifen oder Netze. Unterschieden werden sortierte und nicht-sortierte Formen, deren Durchmesser zwischen wenigen Dezimetern und einigen Metern variieren können. In der periglazialen Tundrazone dominieren nicht-sortierte Formen (SEMMELE 1993).

Ein weiteres charakteristisches Phänomen periglazialer Räume ist die Solifluktion. Der Begriff steht für eine Reihe von komplexen Erscheinungsformen (vgl. z.B.: FRENCH 1996, WASHBURN 1979) und beschreibt ein hangabwärts-gerichtetes Kriechen der sommerlichen Auftauzone im Zusammenhang mit intensiver Frostwechseldynamik auf Hängen mit mehr als 2° Neigung. Je nach Vegetationsbedeckung wird ungebundene von gebundener Solifluktion unterschieden. Bei ungebundener Solifluktion gehen die oben angesprochenen sortierten Frostmusterstrukturen über in Streifen. Die gebundene Solifluktion steht im Zusammenhang mit dichter Vegetation und zeigt sich häufig in Form von stufenförmig erscheinenden Loben (BLÜMEL 1999).

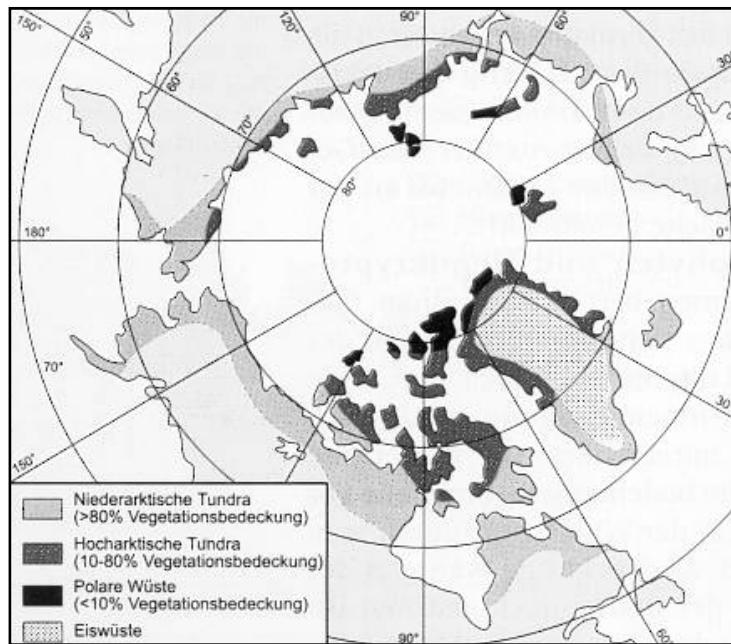
## **2.3. Vegetation und Böden der Tundrazone**

### **2.3.1. Vegetationsgeographische Charakteristiken**

Die Tundra bezeichnet im Allgemeinen die zirkumpolare baumfreie Vegetationszone innerhalb arktischer Gebiete. Sie wird im Norden begrenzt durch die polare Wüste und im Süden durch die Waldtundra. Nach CHERNOV & MATVEYEVA (1997) können mit der Arktischen-Tundra, Typischen-Tundra und Südlichen (Busch und Tussock)-Tundra drei Subzonen unterschieden werden.

Die Pflanzen der Tundra sind Spezialisten, die sich durch Zwergwuchs und Polsterform an die extremen Klimabedingungen angepasst haben. Lange, sehr kalte, dunkle Winter und kurze, kühle Sommer mit relativ häufiger Bewölkung sind charakteristisch für die Tundrazone (FREY & LÖSCH 2004). Entscheidend für das geringe Vegetationswachstum ist der Wärmemangel in der sehr kurzen Vegetationsperiode. Mit der polwärtigen Abnahme der Temperatur nehmen Artenvielfalt und Wuchshöhe ab. Demzufolge ist eine weitere breitenabhängige Zonierung der Tundra möglich, die sich am Bedeckungsgrad der Vegetation orientiert (Abb.5). Die zunächst geschlossene und von Chamaephyten (Zwergsträuchern) dominierte Vegetation geht über in eine Zone, in der Hemikryptophyten-Vergesellschaftungen (d.h. Pflanzen deren Erneuerungsknospen unmittelbar an der Erdoberfläche liegen) überwiegen. Die Vegetationsbedeckung nimmt bis zu einer Zone, die nahezu vegetationsfrei ist oder nur noch sporadisch bewachsen wird, stetig ab (BLÜMEL 1999, SCHULTZ 2002).





**Abb. 5:** Gliederung der Tundra nach dem Bedeckungsgrad (aus SCHULTZ 2002, nach IVES & BARRY 1974)

Die Dominanz der Chamaephyten und Hemikryptophyten beruht auf der optimalen Anpassung der Pflanzen an die strengen Luft- und Bodentemperaturverhältnisse (SCHULTZ 2002). Im Winter werden diese Pflanzen von der Schneedecke geschützt. Die Wuchshöhe der Pflanzen entspricht in etwa der durchschnittlichen Schneemächtigkeit (WEIN 1999). Wind ist in diesem Zusammenhang ebenfalls von Bedeutung für die Vegetationsverhältnisse. Die teils enorme äolische Aktivität führt zur unregelmäßigen Verteilung des Schnees. Exponierte Standorte bleiben weitestgehend schneefrei. Die Folge ist eine mosaikartige Differenzierung der Vegetation. Weitere wichtige Parameter sind Sonneneinstrahlung, Wasserhaushalt sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen (DIERßEN 1996). Kleinräumige Wechsel der Vegetationsbedeckung sind weiterhin mit dem (Mikro-)Relief, der Hydrologie des Standortes sowie pedologischen und geomorphologischen Bedingungen verbunden, also vor allem mit Unterschieden im Wärme- und Feuchtehaushalt (SCHULTZ 2002).

Des Weiteren spielen Isolationseffekte durch die Pflanzenbedeckung und -verteilung eine entscheidende Rolle in der Dynamik arktischer Naturräume. Zum Beispiel geht mit fehlender Vegetation die Isolation des Bodens verloren. Folge ist die Zunahme der sommerlichen Auftauzone (CHERNOV & MATVEYEVA 1997).

### 2.3.2. Bodenkundliche Charakteristik

Im Zusammenhang mit den Reliefeigenschaften der oft weiten und flachen Landschaften und dem Wasserstauereffekt des Permafrosts sind Tundragebiete im Allgemeinen schlecht drainiert. Die Folge ist eine flächenmäßige Dominanz hydromorpher Böden. Gut drainierte Böden treten in ihrer Ausbreitung in den Hintergrund (BLÜMEL 1999). Die Differenzierung arktischer Tundraböden ist abhängig von der hydrologischen Situation, den pedoklimatischen Bedingungen und den petrographischen Eigenschaften des Ausgangssubstrats. Jedoch ist die Bildung der polaren Tundraböden eng mit dem oberflächennahen Permafrost verbunden (SCOTT SMITH & GORYACHKIN 2004). Die Bodenbildung beschränkt sich auf die sommerliche Auftauzone. Mit dem Vorhandensein von Permafrost innerhalb der obersten 100cm des Bodens werden die zonalen Böden der Arktis nach der World Reference Base (FAO 1998) als Cryosols und nach der US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2003) als Gelisols bezeichnet.

Häufigste Böden der Tundra sind Gleyböden. Auf besser drainierten Standorten trifft man auch auf unvergleyte Böden und bei vegetationsarmen Flächen auf Rohböden. Auf Grund der niedrigen Temperaturen werden chemische und biologische Verwitterung jedoch gehemmt. Der langsame Abbau von Humus und die damit verbundene Freisetzung von mineralischen Nährstoffen führen zu teils enormen Humusanreicherungen. Besonders in geschlossenen Senken wird dies anhand ausgeprägter Moor- und Torfböden deutlich (EVERETT et al. 1981). Mit zunehmender Bodenfeuchte steigt der Einfluss kryogener Durchmischungs- und Verlagerungsprozesse wie Kryoturbation und Solifluktion. Die pedogenen Merkmale der Böden werden stellenweise durch kryogene überprägt oder abgelöst (SCHULTZ 2002). Einen Überblick zu den Häufigkeiten und Eigenschaften weiterer pedogener Prozesse bezogen auf bestimmte arktische Zonen bieten GORYACHKIN et al. (1999, 2004).

Die Böden in arktischen Regionen gelten auf Grund des reduzierten Kohlenstoff-Abbaus als eine der wichtigsten Senken für Kohlendioxid und Quellen für Methan. Dies ist insbesondere im Bezug auf eine globale Klimaerwärmung im Zusammenhang mit Treibhausgasemissionen von Bedeutung (GORYACHKIN et al. 1999, SMITH et al. 2004).

## **2.4. Fernerkundung und Spektrometrie**

### **2.4.1. Einleitung**

Fernerkundung bezeichnet die Aufnahme, Verarbeitung und Analyse von Daten zu Oberflächen, Objekten und Phänomenen, die durch indirekte Beobachtungsverfahren, d.h. in Distanz zum Objekt ohne näheren Kontakt gewonnen werden. In der Regel handelt es sich dabei um Abbildungen der Erdoberfläche, die durch spezielle, meist fliegende Sensoren aufgenommen wurden. Die mit den Sensoren gewonnene Information beruht dabei auf der von dem Objekt abgestrahlten elektromagnetischen Energie (ALBERTZ 2001).

Die Fernerkundung hat zur Beobachtung der sich ständig verändernden Erdoberfläche besonders in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Luft- und Satellitenbilder bieten Informationen mit hoher zeitlicher und räumlicher Abdeckung. Außerdem ermöglichen sie die Möglichkeit auch schwer zugängliche Regionen der Erde zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist die Fernerkundung zudem ein kostengünstiges Werkzeug zum Beispiel zur Untersuchung arktischer periglazialer Gebiete. Ein besonderes Augenmerk liegt in der Erforschung von Permafrostverbreitung und periglazialer Geomorphologie (z.B. BOIKE & YOSHIKAWA 2003, ETZELMÜLLER et al. 2001, GROSSE et al. 2005, ZHANG et al. 2004). Des Weiteren sind die Dynamik arktischer Ökosysteme und die Veränderungen innerhalb der Tundralandschaften ein Feld der Anwendung von Fernerkundungsmethoden (z.B. REES et al. 2003, STOW et al. 2004).

Grundsätzlich werden in der Fernerkundung passive und aktive Sensoren unterschieden. Aktive Sensoren messen die von einer eigenen künstlichen Energiequelle ausgesandte und am Zielobjekt reflektierte Rückstrahlung. Passive Sensoren messen dagegen ausschließlich die von der Erdoberfläche ausgehende natürliche Strahlung. Dabei handelt es sich entweder um die an der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung oder um die Temperaturstrahlung (SÖLLNER 2000).

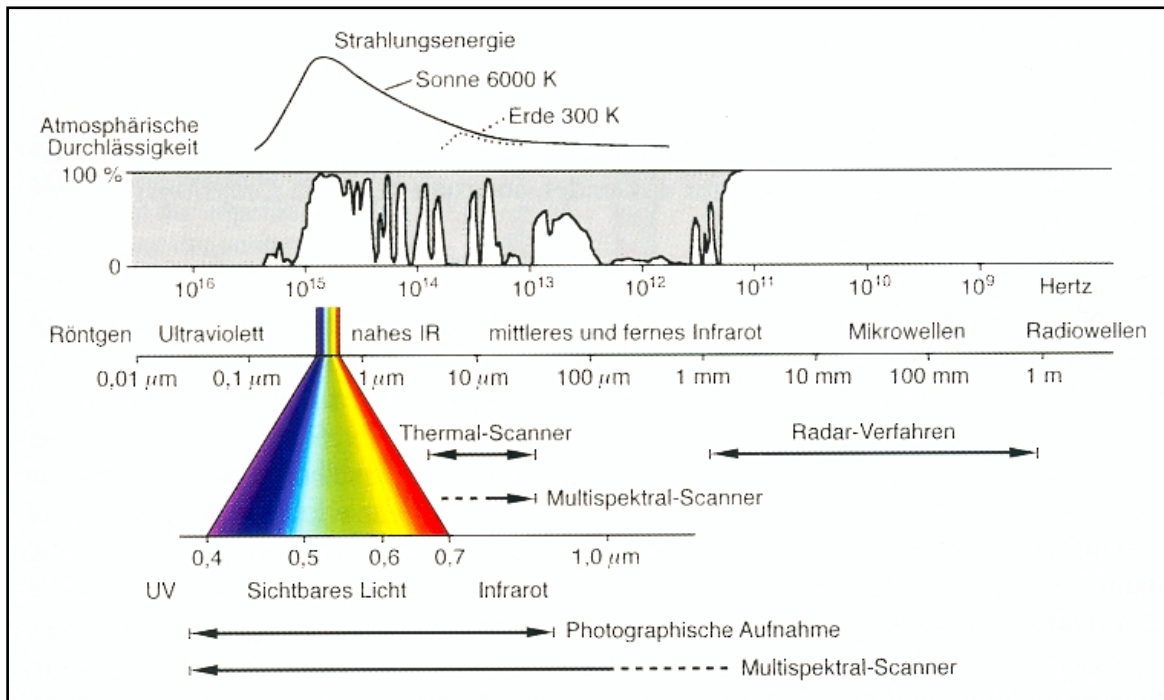
### **2.4.2. Elektromagnetische Strahlung und atmosphärische Effekte**

Elektromagnetische Strahlung ist die Energie die an einem Körper reflektiert und durch ihn absorbiert und transmittiert wird. Aus der Charakteristik der reflektierten Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung eines Objekts können objekt-spezifische Informationen ermittelt werden. Mit zunehmender Wellenlänge und abnehmender Frequenz sind die in der Fernerkundung am meisten genutzten Spektralbereiche der sichtbare Bereich des Lichts (VIS, *visible*) von 400 – 700nm Wellenlänge. Darauf folgt der infrarote Bereich von 700nm bis 1mm und der Mikrowellenbereich ab etwa 1mm bis einige Dezimeter Wellenlänge. Der infrarote Bereich wird noch einmal unterteilt in nahes Infrarot

(NIR, *near infrared range*) bis etwa 1500nm, in kurzwelliges Infrarot (SWIR, *short wave infrared range*) bis etwa 5000nm und thermisches Infrarot (TIR, *thermal infrared range*) ab 5000nm. Die Spektralbereiche gehen ohne spezifische Grenzen ineinander über (Abb.6) (ALBERTZ 2001, SÖLLNER 2000).

Das Strahlungsmaximum der Sonne liegt im sichtbaren Bereich des Lichts bei etwa 500nm und nimmt zum NIR und SWIR hin stark ab. Deshalb messen passive Sensoren vor allem in den Bereichen des VIS, NIR und SWIR (SÖLLNER 2000). Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die eingehende Sonnenstrahlung von Lichtstreuungs- und Absorptionsprozessen beeinflusst. Die Streuung des Lichts geschieht vor allem an in der Atmosphäre befindlichen Partikeln, den so genannten Aerosolen. Das gestreute Licht wird als diffuse Himmelsstrahlung bezeichnet. Die Absorption der eingehenden elektromagnetischen Strahlung geschieht zum Großteil durch atmosphärische Gase. Die wichtigsten sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon (ALBERTZ 2001). Andere Gase wie Kohlenmonoxid, Methan, Stickstoffoxid und Sauerstoff absorbieren weniger stark, spielen aber ebenfalls eine signifikante Rolle für die Charakteristik der elektromagnetischen Spektren (US ARMY CORPS OF ENGINEERS 2003). Die Folge der Absorption sind Bereiche oder Bänder innerhalb des elektromagnetischen Spektrums, die von einem starken Rauschen gekennzeichnet sind und bei der Messung von Reflexionseigenschaften der Erdoberfläche störend sein können (SALISBURY 1998). Starke und für die Fernerkundung relevante Absorptionsbereiche befinden sich bei etwa 1400nm, 1900nm und 2700nm. Besonders störungsfreie und für die Fernerkundung gut nutzbare Wellenlängenbereiche werden als atmosphärische Fenster bezeichnet (vgl. Abb.6).

Die gesamte auf eine Geländeoberfläche einfallende Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet und besteht aus der diffusen Himmelsstrahlung und der direkten Sonnenstrahlung. Sie ist abhängig von verschiedenen Parametern wie Sonnenstand, atmosphärischer Trübung, Bewölkung sowie Exposition und weiteren Geländeeigenschaften (ALBERTZ 2001, MILTON 1987, SALISBURY 1998).



**Abb. 6:** Das elektromagnetische Spektrum mit Darstellung der atmosphärischen Fenster, der Strahlungsenergie der Sonne sowie die Bereiche verschiedener Fernerkundungssensoren (aus ALBERTZ 2001)

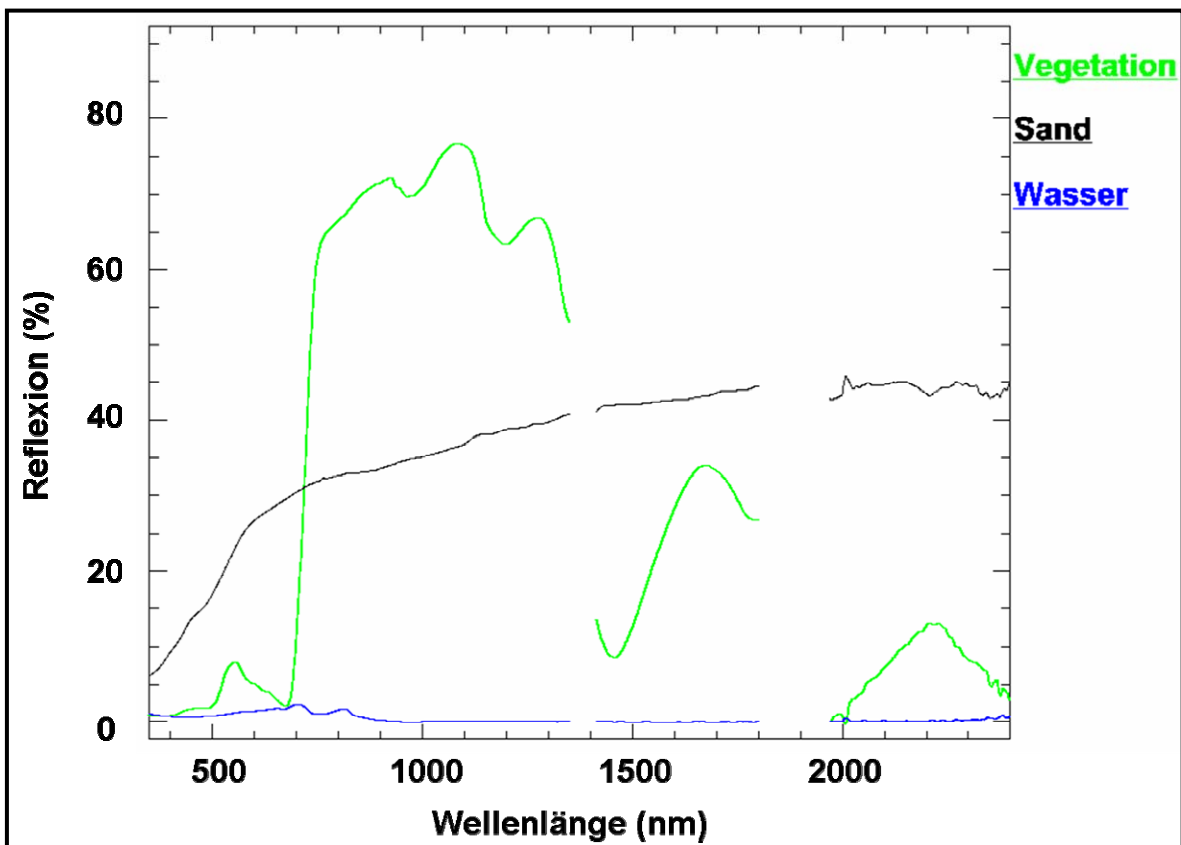
### 2.4.3. Reflexion und spektrale Signaturen von Oberflächen

Die Reflexion einer Oberfläche resultiert aus den spezifischen (bio-)physikalischen Charakteristiken der Oberflächenbeschaffenheit des Objekts, der Bestrahlungs- und Aufnahmegeometrie sowie dem Zustand der Atmosphäre (MILTON et.al. 1995). Das Reflexionsverhalten der Oberfläche wird charakterisiert durch den Prozentsatz der reflektierten elektromagnetischen Strahlung, der in jedem Wellenlängenbereich unterschiedlich ist. Diese Reflexionskurve oder spektrale Signatur eines Materials ist eine unveränderliche Eigenschaft. Die Menge des reflektierten Lichts ist abhängig von der Menge und Wellenlänge der ankommenden Strahlung. Aber der Prozentsatz, welcher reflektiert wird, ist konstant (US ARMY CORPS OF ENGINEERS 2003). Allerdings sind natürliche Oberflächen keine perfekten Reflektoren, vielmehr wird bei der Messung spektraler Signaturen auf die Interaktionen am Objekt fokussiert, die sich aus einfallender, reflektierter und gestreuter Strahlung ergeben (MILTON 1987).

Der Verlauf der Spektralkurven, insbesondere in den Bereichen des VIS bis SWIR zwischen 400 und 2500nm, ermöglicht eine Differenzierung verschiedenartiger Landoberflächen anhand ihrer spezifischen spektralen Eigenschaften. Durch die chemischen und (bio-)physikalischen Eigenschaften eines Objektes können auch verschiedene Absorptionsbänder innerhalb der Spektralkurven vorhanden sein. Mit zunehmender Kenntnis der spektralen Signaturen verschiedener Oberflächen ist dies zum großen Vorteil in der Fernerkundung geworden. Anhand bestimmter Absorptionsbänder

und der daraus resultierenden spezifischen spektralen Signaturen können zum Beispiel verschiedene Minerale oder einzelne Pflanzenarten spektral unterschieden werden (z.B. CLARK 1999, VAN DER MEER 2004).

Durch Spektrale Bibliotheken ist der Vergleich mit spektralen Signaturen bekannter Oberflächen, Objekte und Materialien möglich, die unter überwachten, idealen Bedingungen aufgenommen wurden. Die zwei wichtigsten sind USGS Digital Spectral Library (CLARK et.al. 2004) und ASTER Spectral Library (JET PROPULSION LABORATORY 1999).



**Abb. 7:** Spektrale Signaturen von grüner Vegetation, vegetationsfreiem Boden (Sand) und Wasser. Grafik zusammengestellt aus eigenen Daten. Bereiche atmosphärischer Störung zwischen 1350 - 1415 nm und 1800 - 1970 nm wurden entfernt

Zum Beispiel wird die spektrale Signatur von Vegetation durch die Blattpigmente, insbesondere Chlorophyll a und b, die Zellstruktur der Blätter, dem Wassergehalt der Pflanzen und der Architektur des Pflanzenbestandes (Bedeckung, Blattflächenindex u.a.) bestimmt. Das Reflexionsverhalten von Pflanzen ändert sich mit der phänologischen Entwicklung während der Vegetationsperiode. Spektrale Signaturen von Pflanzen haben zwei generelle Formen. Die der grünen, photosynthetisch aktiven Vegetation wird durch die Absorption des in den Blättern enthaltenden Wassers im NIR und des Chlorophyll im VIS charakterisiert. Kennzeichnend ist der steile Anstieg der Kurve zwischen 690 und

740nm (s. Abb.7). Der so genannte *red edge* markiert die Grenze zwischen Chlorophyllabsorption im VIS und starker Reflexion grüner Pflanzen im NIR. Er steht in engem Zusammenhang mit der Vitalität der Vegetation (z.B. CURRAN et al. 1990). Trockene, nicht photosynthetisch aktive Vegetation zeigt Absorptionsbänder von Cellulose, Lignin und Nitrogen (Albertz 2001, Clark 1999, Söllner 2000).

Typische Spektralkurven von vegetationsfreien Böden (Abb.7) nehmen mit der Wellenlänge zu und bleiben konstant flach im NIR und SWIR. In Abhängigkeit von der Feuchtigkeit der Oberfläche zeigen sich Absorptionsbänder des Wassers oder Absorptionsbänder verschiedener Minerale, z.B. Tonmineral bei 2200nm sowie organischer Substanzen und Eisenverbindungen, soweit diese vorhanden sind. Die Reflexion von mineralischen Böden nimmt mit zunehmender Korngröße ab. Gründe dafür sind die kleinere Reflexionsfläche und die stärkere Streuung des Lichts. (CLARK 1999, VAN DER MEER 2004).

Die spektrale Reflexion von Wasser ist über alle Spektralbereiche des VIS, NIR und SWIR gering (Abb.7). Wasser mit hoher Suspensionsfracht weist einen deutlichen Anstieg im sichtbaren Bereich des Spektrums auf (RICHARDS & JIA 1999).

Spektrale Signaturen bieten punktuelle Informationen über Art und Zustand der Vegetation und des Bodens. Satellitendaten können genutzt werden, um flächenhafte Informationen über das Reflexionsverhalten verschiedener Oberflächen zu erhalten. Die spektrale Information eines Bildpixels besteht immer aus Mischsignaturen, z.B. Informationen aus Vegetation und Bodenfeuchte unter anderem. Durch spektrale Indizes, d.h. durch die rechnerische Kombination verschiedener Spektralbereiche, lassen sich Oberflächen genauer unterscheiden. Zum Beispiel bieten Vegetationsindizes die Möglichkeit, vitale Vegetation und unbewachsene Oberflächen zu differenzieren (ALBERTZ 2001, RICHARDS & JIA 1999, SÖLLNER 2000).

#### **2.4.4. Fernerkundungssysteme und -verfahren**

In den letzten Jahren wurden zunehmend räumlich und/oder spektral hoch auflösende Fernerkundungssysteme entwickelt, die für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden. Überblicke geben ALBERTZ (2001), RICHARDS & JIA (1999), SÖLLNER (2000) u.a. Einen Ausschnitt aus den vielfältigen Möglichkeiten zur Nutzung verschiedenster Fernerkundungssysteme in arktischen Ökosystemen bieten beispielsweise STOW et al. (2004) und ZHANG et al. (2004).

Die Aufgabenstellung bzw. das Untersuchungsgebiet beeinflussen die Auswahl und Qualität der Fernerkundungsdaten. Die Qualität von Fernerkundungsdaten zur Charakterisierung geomorphologischer Strukturen ist abhängig von der Auflösung. Eine höhere räumliche Auflösung bietet die Möglichkeit, Objekte im Bild besser voneinander zu

trennen. Die räumliche Auflösung ist die Größe eines Bildpixels. Sie sollte mindestens die Hälfte des beobachteten Objekts betragen, damit es zu erkennen ist. Als spektrale Auflösung wird die Breite und Anzahl der Spektralkanäle bezeichnet, welche ein System messen kann. Eine hohe spektrale Auflösung hilft somit, die spektralen Signaturen der Oberflächen genauer zu differenzieren (RICHARDS & JIA 1999).

Zu den US-amerikanischen Systemen gehören die 1972 eingeführten Landsat-Satelliten. Sie wurden seitdem ständig weiter entwickelt und sind mit optisch-mechanischen Scannern ausgestattet. Der 1999 in die Umlaufbahn gebrachte Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) zeichnet Daten in 8 Spektralkanälen auf (Tab.1). Die Landsat-7 Bahnparameter ermöglichen eine Bildwiederholrate von 16 Tagen für jede Aufnahmelokalität (ALBERTZ 2001).

Beispielhaft für eine hohe spektrale Auflösung steht das CHRIS/PROBA System der ESA. Es liefert von kleinräumigen Gebieten hyperspektrale Daten mit guter räumlicher Auflösung (Tab.1). Das System wurde 1998 zu Testzwecken gestartet und liefert seit 2001 für verschiedene Anwendungen nutzbare Daten. Der CHRIS Sensor ist ein mit optoelektronischen Scannern ausgestattetes abbildendes Spektrometer. CHRIS/PROBA erfasst gleichzeitig alle Pixel einer Bildzeile, die sich quer zur orientierten Flugrichtung befindet. Dies geschieht beim Überflug aus 5 verschiedenen Aufnahmewinkeln. Der Satellit hat ebenfalls eine Wiederholrate von 16 Tagen und kann in 5 formellen Modi operieren, die verschiedene räumliche und spektrale Auflösungen kombinieren (CUTTER & JOHNS 2005, GUANTER et.al. 2005).

#### **2.4.5. Feldspektrometrie**

Zur Vor-Ort-Validierung von Satellitendaten wurden Methoden wie die der Feldspektrometrie entwickelt. Diese ermöglicht direkte und vom Anwender kontrollierte Messungen hoch aufgelöster spektraler Signaturen von Objekten an der Erdoberfläche, die dann für quantitative und qualitative Bewertungen von Satellitendaten herangezogen werden können. Teils umfangreiche Übersichten zur Nutzung der Feldspektrometrie, zu verschiedenen Geräten, zu Einflussfaktoren während der Aufnahme von Feldspektren und zur geschichtlichen Entwicklung der Spektrometrie geben CURTISS & GOETZ (1994), MILTON (1987), MILTON et.al. (1995) und SALISBURY (1998). Die Feldspektrometrie macht die quantitative Messung von Strahlung, Strahlungsdichte, Reflexion oder Transmission direkt im Feld möglich. Sie beinhaltet das Studium der gegenseitigen Beziehungen zwischen den spektralen Eigenschaften eines Objekts und den jeweiligen (bio-) physikalischen Eigenheiten innerhalb der natürlichen Umwelt. Typischerweise werden dafür portable, Batterie-betriebene Spektroradiometer, wie z.B. das ASD FieldSpec®FR der Firma Analytical Spectral Devices Inc. benutzt. Dieses Gerät misst im Spektralbereich



von 350 bis 2500 nm (Tab.1). Über ein Glasfaserkabel werden die Messungen von 3 wellenlängenabhängigen Spektrometern im Gerät aufgenommen, in einen tragbaren Rechner übertragen und in Echtzeit dargestellt. Die Aufnahmezeit einer Einzelmessung beträgt 0,1 sec. Der optische Aufnahmewinkel ist über die Verwendung einer entsprechenden Voroptik variabel zwischen 1° und 24° einstellbar. Die Aufnahme akkurater Feldspektren erfordert Kenntnisse der Aufnahmesituation und Felddaten für die Charakterisierung der untersuchten Objekte bzw. Oberflächen (ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES 2004, CURTISS & GOETZ 1994, SALISBURY 1998).

**Tab. 1:** Technische Daten, Spektralkanäle und Auflösung verschiedener Aufnahmesysteme (nach ALBERTZ 2001, ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES 2004, CUTTER & JOHNS 2005)

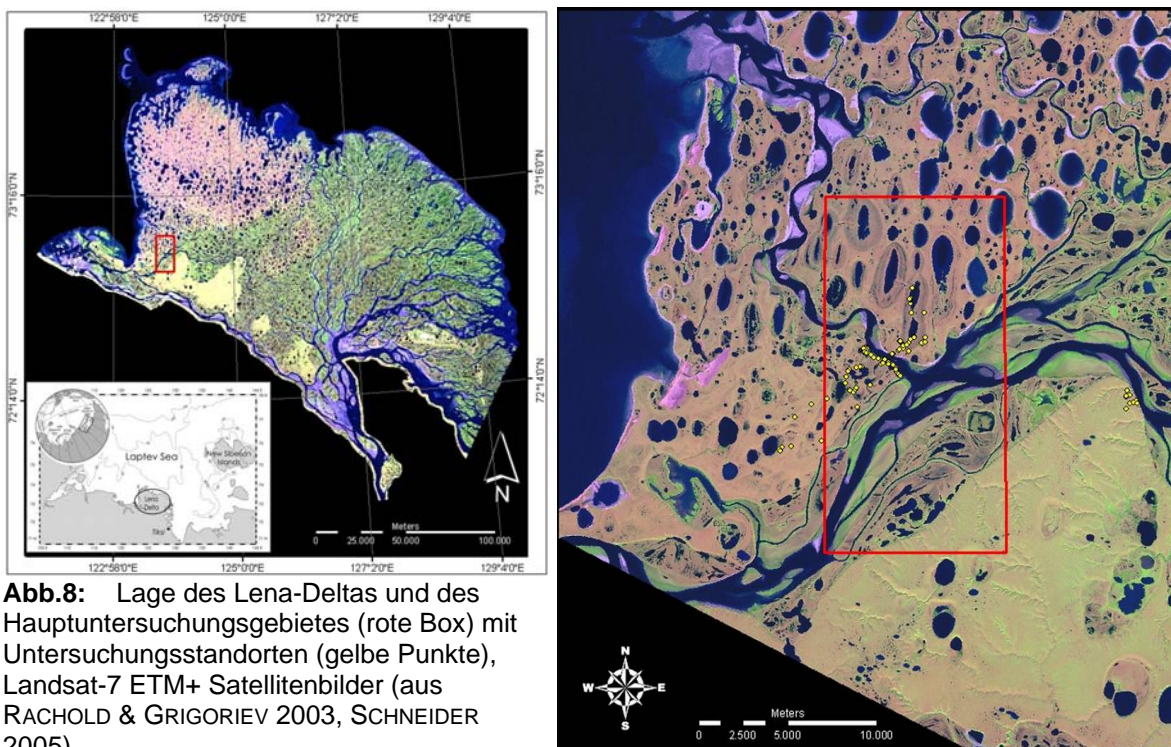
	<b>LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)</b>	<b>CHRIS/PROBA Mode 3 Land Channels</b>	<b>ASD FieldSpec-FR™</b>
<b>Aufnahmehöhe</b>	705 km	556 km	ca. 1 m
<b>Abdeckung</b>	185 km Streifenbreite	13 x 13 km	Punktuell
<b>Räumliche Auflösung</b>	30 x 30 m (VIS-SWIR) 15 x 15 m (pan), 120 x 120 m (TIR)	17 x 17 m	Variabel, ca. 0,4 x 0,4 m bei der Nutzung als Handmessgerät in 100 cm Höhe und einer Voroptik mit 24° Öffnungswinkel
<b>Spektralkanäle</b>	8 (450-12500 nm)	18 (438 – 1035 nm)	512 (350 – 1000 nm) 1060 (1000 – 2500) 2151 interpoliert auf jeden Nanometer
<b>Spektralbänder bzw. Auflösung</b>	450 – 520 nm 530 – 610 nm 620 – 690 nm 780 – 900 nm 1550 – 1750 nm 10400 – 12500 nm (TIR) 2090 – 2350 nm 520 – 900 nm (pan)	438 – 447 nm 486 – 495 nm 526 – 534 nm 546 – 556 nm 566 – 573 nm 627 – 636 nm 656 – 666 nm 666 – 677 nm 694 – 700 nm 700 – 706 nm 706 – 712 nm 738 – 745 nm 745 – 752 nm 773 – 788 nm 863 – 881 nm 891 – 900 nm 900 – 910 nm 1002 – 1035 nm	3 nm für 350 – 1000 nm  10 nm Für 1000 – 2500 nm

### 3. Untersuchungsgebiet

#### 3.1. Das Lena-Delta (geographische Lage)

Das Lena-Delta ist mit 32000km<sup>2</sup> das größte arktische Delta und gleichzeitig das zweitgrößte der Welt (WALKER 1998). Es befindet sich im Nordosten Sibiriens zwischen 123° und 129° östlicher Länge und 72° und 74° nördlicher Breite (Abb.8). Das Lena-Delta, an der Grenze zwischen sibirischer Landmasse und der Laptev-See gelegen, gilt als ein Schlüsselobjekt in der Erforschung der periglazialen Umwelt (RACHOLD & GRIGORIEV 2003). Des Weiteren stellt das Delta unter anderem als bedeutendes Brutgebiet vieler Zugvögel ein sensibles Ökosystem dar (MÜLLER 1997).

Die Lena entspringt im nördlichen Bereich der Baikalfaltenzone und mündet in die Laptev-See. Sie fließt mit einer Länge von etwa 4250km über 20 Breitengrade von Süd nach Nord und entwässert ein Einzugsgebiet mit 2.425.000km<sup>2</sup>. Die jährliche Sedimentfracht der Lena beträgt ca. 15.000.000 Tonnen. Auf Grund der enormen Abflussrate von 16650m<sup>3</sup>/sec ist der gesamte Deltabereich Süßwasser-beeinflusst. Insgesamt gibt es mehr als 800 einzelne Wasserarme im Delta. Das Lena-Delta besteht aus über 1500 größeren und kleineren Inseln. Die Größten befinden sich im westlichen und südlichen Teil des Deltas. Eine der größten mit ca. 7000km<sup>2</sup> ist Arga-Muora-Sise (MÜLLER 1997, WALKER 1998).

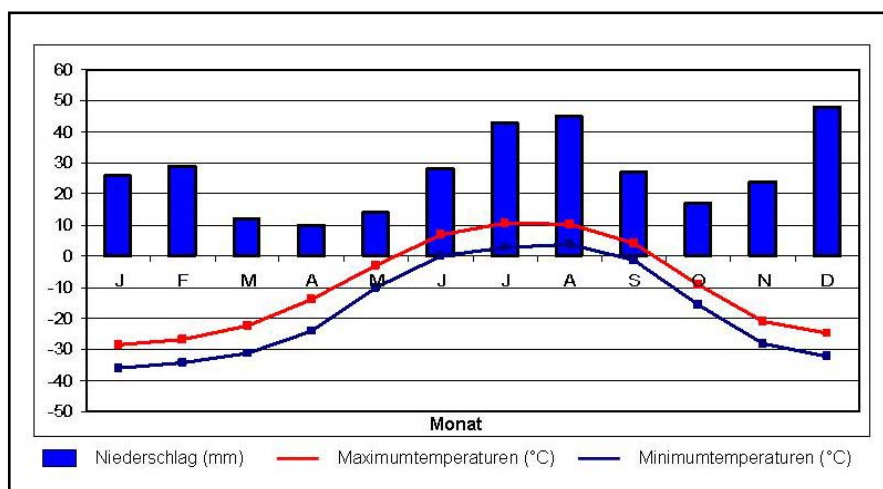


**Abb.8:** Lage des Lena-Deltas und des Hauptuntersuchungsgebietes (rote Box) mit Untersuchungsstandorten (gelbe Punkte), Landsat-7 ETM+ Satellitenbilder (aus RACHOLD & GRIGORIEV 2003, SCHNEIDER 2005)

### 3.1.1. Klimatische, vegetationskundliche und allgemeine pedologische Bedingungen

Nach KÖPPEN (1931) gehört das Gebiet des Lena-Deltas zum ET – Klimatyp, d.h. zum polaren Tundrenklima. Das bedeutet, dass die mittlere Lufttemperatur des wärmsten Monats 10°C nicht überschreitet. Es herrscht ein ausgeprägtes Jahreszeitenklima mit kalten Sommern und strengen, schneearmen Wintern. Die längste Wärmeperiode mit positiven Tagestemperaturen ist von Mitte Juli bis Mitte August. Jedoch kommt es während des gesamten Sommers zu Frühfrösten am Boden und in der Luft. Im Sommer wird das Wetter durch vor allem vom Meer zum Land wehende Winde beeinflusst. Tiefdruckwetterlagen bringen häufig bewölktetes Wetter mit gefrierenden Regen und nassen Schneefällen. Im Winter überwiegen Hochdruckwetterlagen. Die mittlere Jahrestemperatur der Luft beträgt -14°C (GRIGORIEV et al. 1996), jedoch sind die Unterschiede im Jahresverlauf sehr groß (Abb.9). Die mittlere Januar-Temperatur beträgt -32,4°C und die mittlere Junitemperatur 6,8°C. Die Daten wurden ermittelt aus einer dreißigjährigen Messreihe aus der wenige Kilometer südlich vom Delta gelegenen Stadt Tiksi (WWIS 2006).

Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei max. 250mm, mit Maxima im Juli, August und Dezember (vgl. Abb.9). Bereits im Oktober bildet sich eine dauerhafte Schneedecke, die erst Anfang Juli wieder aufgelöst wird, aber an geschützten Standorten auch den Sommer überdauern kann. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Schneedecke liegt bei 40cm. Neben der ganzjährigen Windaktivität führen vor allem zu Beginn und am Ende des Winters auftretende Sturmereignisse zu beträchtlichen Umlagerungen des Schnees (GRIGORIEV et al. 1996). Trotz des geringen Niederschlags überwiegt auf Grund der sehr geringen Evapotranspiration das Wasserangebot. Somit kann das Gebiet des Lena-Deltas als humid bezeichnet werden.



**Abb.9:** Klimatische Information für das Lena-Delta, 30-jähriges Mittel (1961-1990) für Tiksi (71,9°N; 128,9°O) (erstellt nach WWIS 2006)

Ein eingeschränktes Pflanzenwachstum ist auch für das arktische Lena-Delta charakteristisch. Verantwortlich dafür ist neben den extremen Klimaverhältnissen auch ein ausgeprägtes solares Jahreszeitenklima (SCHULTZ 2002). Auf Grund der geographischen Breite kommt es zum halbjährlichen Wechsel von Polartag und Polarnacht. Daraus folgt, dass in den Monaten Oktober bis März ein Pflanzenwachstum kaum möglich ist und die Photosynthese zum Erliegen kommt. Dagegen kann in den Sommermonaten die Photosynthese gantztägig erfolgen. Aber auch während des Sommers, ist ein diurnaler Rhythmus in der Photosyntheseaktivität der Pflanzen zu beobachten (KUTZBACH 2005). Die Vegetationsperiode ist kurz und beträgt zwischen 60 und 80 Tagen (GRIGORIEV 1993, SCHULTZ 2002). Nach dem Grad der Vegetationsbedeckung kann der nördliche Teil des Lena-Deltas zur hocharktischen Tundra (10-80 % Bedeckung) und der südliche Teil zur niederarktischen Tundra (> 80 % Bedeckung) gezählt werden (vgl. Abb.5). Zudem gliedern CAVM TEAM (2003) den nordwestlichen Teil des Deltas zu den Feuchtgebieten in den kälteren Regionen der Arktis. Der südliche und südöstliche Teil zählt zu den Feuchtgebieten in milderer arktischen Regionen. Unterschieden werden die zwei Bereiche anhand der Vegetationsgesellschaften. Der südliche und südöstliche Teil ist geprägt durch das vermehrte Auftreten von Zwergsträuchern. Die Wuchshöhe der Sträucher ist allerdings geringer als 40 cm. Die Vegetation des Lena-Deltas setzt sich generell neben zahlreichen Flechten und Moosen aus mindestens 284 höheren, meist mehrjährigen Pflanzenarten zusammen (MÜLLER 1997). Die Zusammensetzung der Vegetationsgesellschaften ist abhängig von spezifischen Standortbedingungen wie Reliefsituation, Geomorphologie, Bodenfeuchte und –temperatur. Am häufigsten vertreten in der weiten, flachen Polygonlandschaft des Deltas sind kriechende Weiden (*Salix sp.*), Gräser und Seggen (z.B. *Carex sp.*, *Festuca sp.*, *Eriophorum sp.*) sowie weitere kriechende Zwergsträucher und Kräuter (z.B. *Betula sp.*, *Vaccinium sp.*, *Dryas sp.*, *Ranunculus sp.*). Dabei dominieren in versumpften und feuchten Bereichen wie Thermokarstsenken und Polygonzentren vor allem feuchtigkeitsliebende Sauergräser (*Cyperaceae*). Auf trockeneren, besser drainierten Standorten (z.B. Pingos, Hänge oder Sandflächen) kommen neben den oben genannten Arten auch ansonsten seltenere Pflanzen vor, wie *Draba sp.* oder *Diapensia laponica* (KIENAST & TJSHERKASOVA 2001, MÜLLER 2001).

Die Böden des Lena-Deltas gehören zu den arktischen Tundraböden. Pedogenetische Prozesse werden abgesehen von den typischen und Boden beeinflussenden Umweltbedingungen, wie Relief, Klima, Vegetation und Ausgangsmaterial, auch durch den Permafrost und die periodische Überflutung in den aktiven Deltabereichen gesteuert. Charakteristisch für die Polygonlandschaft des Deltas sind vor allem kryoturbierte, hydromorphe Böden wie Gleye und vertorfte Moorböden. Dazu kommen Auenböden in

den Überflutungsbereichen. Auf besser drainierten Standorten mit günstigeren Bodentemperaturen findet man vor allem initiale Böden, seltener verbrauchte Böden (MÜLLER 1997, NAUMOV 2004). Periodische Überflutungen und sehr geringe Zersetzungsraten führen zum Aufwachsen der Böden. Durch die damit verbundene Permafrostaggradation kommt es zur Fixierung des organischen Materials. Die Böden im Lena-Delta gelten daher als bedeutende Kohlenstoffsenken (KUTZBACH 2005, MÜLLER 1997).

### **3.1.2. Geomorphologische und geologische Charakterisierung**

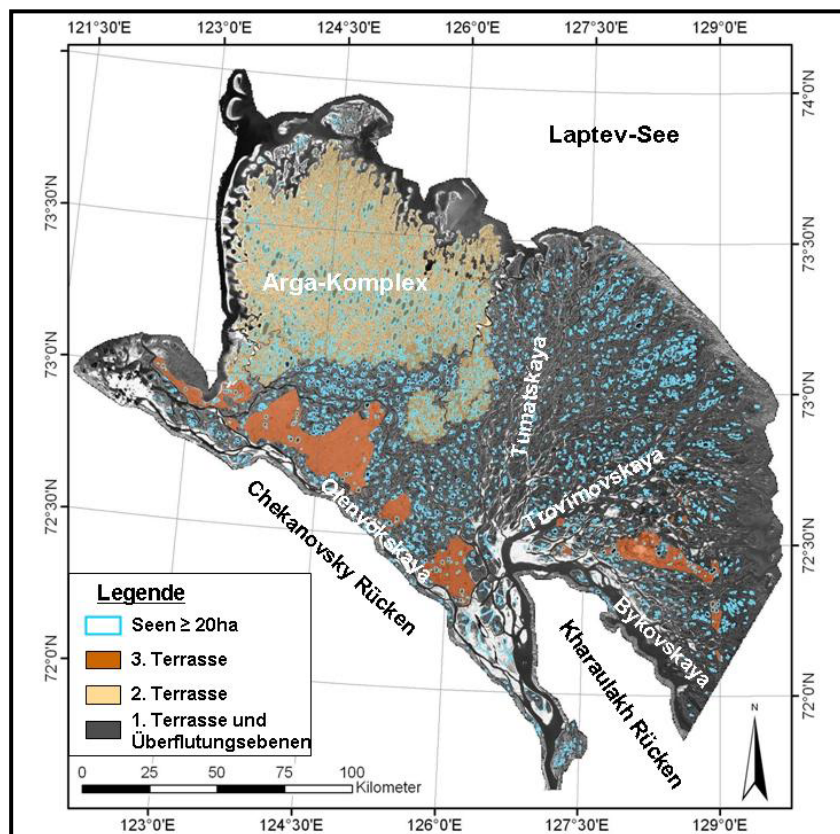
Der Bau und die Entwicklung des Lena-Deltas und seiner einzelnen Einheiten sind durch die strukturelle tektonische Situation des Deltas und durch globale Klimawechsel bestimmt. Das Lena-Delta befindet sich in einem Bereich, in dem die seismisch aktive arktische Riftzone in den eurasischen Kontinent übergeht. Die Riftzone stellt eine Grenze zwischen eurasischer und nordamerikanischer Lithosphärenplatte dar. Die spätquartäre Entstehung des Deltas ist neben den tektonischen Bewegungen mit Meeresspiegelschwankungen und der Sedimentfracht der Lena verbunden. Das Lena-Delta ist fast vollständig aus quartären Sedimenten aufgebaut, die einen riesigen Schwemmkegel auf dem heutigen Laptev-Schelf bilden (GALABALA 1987). Die überwiegend fluvialen Ablagerungen können in eine ältere westliche und eine jüngere östliche Zone untergliedert werden. Das moderne Delta im östlichen Teil bildete sich erst im Holozän im Zusammenhang mit einer Meeresstransgression der Laptev-See (SCHWAMBORN et al. 2002). Neben den alluvialen Deltaablagerungen der Lena kommen im Süden und Westen aber auch spätpleistozäne Sedimente vor, die nicht der Lena entstammen. Ältere devonische Ablagerungen sind nur fragmentarisch zu finden (GRIGORIEV et al. 1996). Diese markieren teilweise eine N-S verlaufende aktive Bruchzone zwischen dem Ost- und Westteil des Deltas (ALEKSEEV & DROUCHITS 2004). Ein Beispiel ist der Felsen Stolb, gelegen am Beginn des Trofimovskaya Kanals, der aus carbonatischen Sand-, Schluff- und Tonsteinfolgen aufgebaut ist. Die das Delta südlich begrenzenden Gebirgsrücken sind gekennzeichnet durch Sandsteine und mesozoische Schiefer (KUNITZKY & SCHIRRMEISTER 2001) (vgl. Abb.10).

Ein Großteil des Deltas ist geomorphologisch hoch aktiv. Das zeigt sich zum einen durch große Mengen an Sedimenten (vor allem Sand und Silt), die im Delta abgelagert werden. Nur 30% der Sedimentfracht der Lena erreichen das Meer. Zum anderen verändern starke Fluss- und Küstenerosion (durchschnittlich 4-5m/Jahr an den Deltainseln) und die äolische Verlagerung von Sedimenten ständig die Struktur des Deltas (ARE & REIMNITZ 2000, GRIGORIEV & SCHNEIDER 2002, WALKER 1997). Zudem befindet sich das Lena-Delta in der periglazialen Tundrazone. Es wird von kontinuierlichem Permafrost mit Mächtigkeiten von 500 - 600m unterlagert. Die sommerliche Auftauzone (active layer)

beträgt 30 - 90cm. Unter größeren Seen und Flussarmen sind Taliks vorhanden (GRIGORIEV 1993). Daher ist das periglaziale Bild der Landschaft geprägt durch Thermokarst, Thermoerosion, Eiskeilpolygone und Pingos. Unter Pingos versteht man perennierende, meist konische, kreisrunde Hügel mit einem massiven Eiskern (KARTE 1979, WASHBURN 1979)

Die Sediment- und Wasserverteilung im Delta ist nicht gleichmäßig. Man unterscheidet vier große Seitenarme, die den Großteil des Wassers und der Sedimentfracht liefern. Der Größte, der Trofimovskaya Kanal in Richtung Osten, transportiert 61%. Der Bykovskaya Kanal in Richtung Südost bringt 25%. Der Tumatskaya Kanal in Richtung Norden und der Olenyokskaya Kanal in Richtung Westen liefern jeweils 7% des jährlichen Abflusses (s. Abb.10) (ALABYAN et al. 1995).

Das Lena-Delta stellt ein geomorphologisches Mosaik aus spätpleistozänen Erosionsresten und holozänen bis rezenten Akkumulationsbereichen dar. Die Entstehung und Entwicklung des Lena-Deltas wird bis heute diskutiert und ist noch nicht vollkommen verstanden (vgl. u.a. ARE & REIMNITZ 2000, GRIGORIEV 1993, 1996, SCHIRRMEISTER et al. 2003, SCHWAMBORN et al. 2002). Nach GRIGORIEV (1993) werden im Allgemeinen drei geomorphologische Hauptterrassen untergliedert, die sich in ihren lithologischen, geokryologischen sowie hydrologischen Eigenschaften unterscheiden (Abb.10).



**Abb.10:** Geomorphologische Gliederung und Hauptkanäle des Lena-Deltas (aus MORGENSTERN 2005, verändert nach GRIGORIEV 1993)



Die erste Hauptterrasse (1 - 12m über NN) wird aus aktiven Deltabereichen und holozänen Ablagerungen gebildet. Der größte Teil befindet sich im Osten zwischen dem Tumatskaya und Bykovskaya Kanal. Die Ablagerungen wechseln von organikreichen Sanden im unteren Abschnitt zu schluffig-sandigen Torfen in den oberen Bereichen (SCHWAMBORN et.al. 2002). Neben der eigentlichen Oberfläche der ersten Terrasse (8 - 12m über NN) kann man noch zwischen einem unteren rezenten Aueniveau (1 - 4m über NN) und einem oberen Aueniveau (4 - 9m über NN) unterscheiden. Die rezente Aue ist auf Grund der jährlichen Überflutungen stellenweise durch spärliche Vegetationsbedeckung geprägt. Das obere Auenniveau, welches nur selten zu Hochflutereignissen überschwemmt wird, ist durch Thermokarstseen, Polygonstrukturen und Sedimente mit hohem Eisgehalt gekennzeichnet. Daneben sind in den Ablagerungen der oberen Auen mächtige polygonale Eiskeile zu finden, die sich im aktiven Wachstum befinden (GALABALA 1987). Die eigentliche erste Terrasse wird als der Bereich definiert, der nicht mehr überflutet wird. Ausgeprägte Polygonstrukturen und Thermokarstseen sind hier charakteristisch (PAVLOVA & DOROZHKINA 2001). In den Ablagerungen der ersten Terrasse sind häufig Schwemmhölzer zu finden. Zudem werden die Sedimente in den oberen Bereichen mitunter vollständig von Eiskeilen mit Mächtigkeiten von 2 - 3m durchdrungen (GALABALA 1987). Die Böden der ersten Hauptterrasse zeigen eine nahezu homogene Verbreitung von Glacic Aquiturbels und Typic Historthels<sup>1</sup>. Erstere sind auf den gut drainierten Rändern der Polygone zu finden, letztere in den feuchten bis sehr feuchten Polygonzentren. Auf trockeneren Standorten, in der Nähe von Erosionskliffs und auf rezenten äolischen Akkumulationsflächen findet man vor allem kryoturbierte sowie ungestörte sandige Böden (Psammentic Aquorthel, Psammentic Aquiturbel, Typic Psammorthel) (PFEIFFER et al. 2002).

Der Wechsel der Sedimentation vom westlichen Teil des Deltas auf den östlichen Teil während des mittleren Holozäns wird auf tektonische Aktivität entlang der N-S verlaufenden Bruchzone inmitten des Deltas zurückgeführt (SCHWAMBORN 2002 et al.).

Die zweite Hauptterrasse (auch Arga-Komplex, siehe unten) (11 - 30m über NN) befindet sich im westlichen Teil des Deltas zwischen dem Tumatskaya und Olenyokskaya Kanal (Abb.10). Den größten Teil der Terrasse bildet die Insel Arga-Muora-Sise. Die spätpleistozänen bis frühholozänen sandigen Sedimente haben einen sehr geringen Eisgehalt (ARE & REIMNITZ 2000). Sie sind allerdings gekennzeichnet durch eine spezifische Kryotextur. Diese zeigt sich stellenweise in Aufschlüssen durch dichte Ansammlungen und Kreuzungen von Eiskeilen verschiedener Generationen (GALABALA 1987). Die Entstehung der Ablagerungen wird bis heute diskutiert. Die Relikte der zweiten Terrasse sind stark durch denudative Prozesse beeinflusst. Typisch ist ein weit

---

<sup>1</sup> Bodenbezeichnungen sind nach US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2003) angegeben.

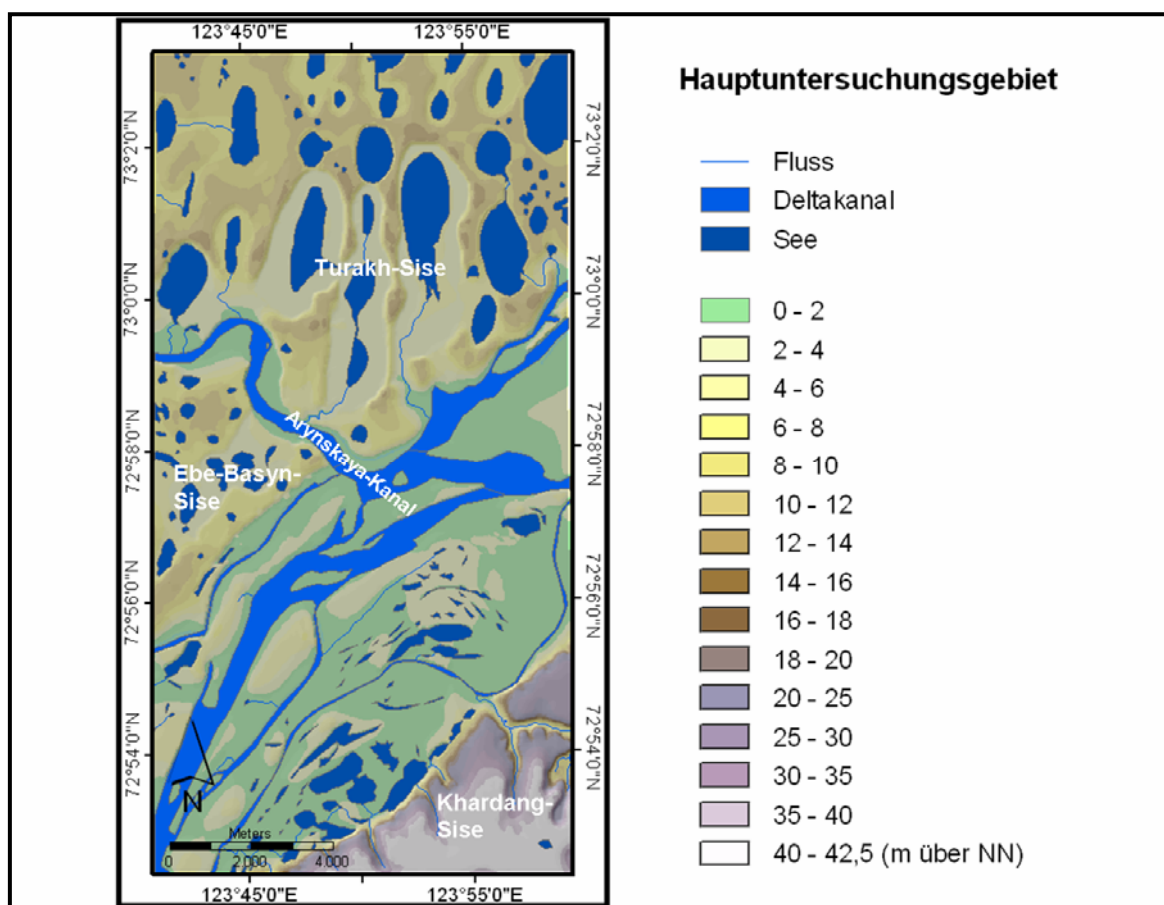
verbreitetes Thermokarstrelief mit nahezu N-S orientierten Seen. Generell erscheinen die Inseln der zweiten Terrasse als flach geneigte Sandrücken mit großen, schlecht drainierten, sumpfigen Depressionen (PAVLOVA & DOROZHINA 2001). Die Böden sind durchweg durch Feinsande geprägt und mehr oder weniger stark kryoturbiert. Auf flach geneigten Oberflächen findet man teils kryoturbierte Typic Histoturbels mit ausgeprägten Torfhorizonten. Auf besser drainierten Standorten kommen vor allem sandige initiale Böden vor. Diese organikarmen Böden zeigen häufig Vergleyung in den unteren Horizonten sowie Kryoturbationsmerkmale. In den sandigen Sedimenten kann die sommerliche Auftauzone bis zu 120cm betragen (KUTZBACH & KURCHATOVA 2002).

Die dritte Hauptterrasse (30 - 60m über NN) ist geprägt durch spätpleistozäne, sandige Sedimente, die von sehr eisreichen, organischen Ablagerungen, dem so genannten Eiskomplex, überlagert werden. Die fluvialen Sande im unteren Teil der dritten Terrasse entstammen wahrscheinlich einem Paläo-Flusssystem der Lena. Schwermineraluntersuchen haben gezeigt, dass die Sedimente denen der rezenten Lenaablagerungen ähneln (SCHWAMBORN et al. 2002). Die Grenze zwischen den Sandlagen und dem darüber liegenden Eiskomplex ist sehr abrupt. Die Gründe dafür sieht man in Klimaänderungen sowie tektonischen Einflüssen während der Sedimentation. Die Ablagerungen des Eiskomplexes entstammen den südlich gelegenen Bergrücken. Korngrößen- und Schwermineraluntersuchungen zeigen, dass die Sedimente nivalen Ursprungs sind. Sie wurden lokal im Gebirge ausgewaschen und polygenetisch, d.h. durch verschiedene Prozesse, im Vorland abgelagert (SCHIRRMEISTER et al. 2003). Erosionsreste der 3. Terrasse sind reliktsch am südlichen Rand des Lena Deltas, entlang des Chekanovsky- und Kharaulakh-Rückens vorhanden (vgl. Abb.10). Typisch für den Eiskomplex sind extrem eisreiche Sedimente mit hohem Organikgehalt. Der Eisgehalt übersteigt häufig den Anteil der vorhandenen Sedimente und kann bis zu 90 Masseprozent betragen (SCHIRRMEISTER et.al. 2003, SCHWAMBORN et.al. 2002). Charakteristisch sind mehrere Meter mächtige syngenetische Eiskeile (vgl. u.a. MEYER 2003). In den sedimentären Abfolgen des Eiskomplexes treten zudem zahlreiche Paläoböden auf (SCHIRRMEISTER et.al. 2003). Die Oberfläche der dritten Terrasse ist geprägt durch Thermokarstdepressionen und Pingos. Besonders auffällig sind zahlreiche Thermoerosionstäler an den Rändern der Terrasse (s. Abb.3). Diese können V- oder U-förmig sein. Die Böden sind beeinflusst durch eine schluffig-lehmige Textur, hohen Organikanteil und feuchte Bedingungen (PFEIFFER et.al. 2002).



### 3.2. Arga-Komplex (Hauptuntersuchungsgebiet)

Das Hauptuntersuchungsgebiet befindet sich im Nordwesten des Lena-Deltas am Arynskaya Kanal. Hier treffen mit Turakh-Sise, Ebe-Basyn-Sise und Khardang-Sise drei größere Deltainseln aufeinander. Die Insel Turakh-Sise und der untersuchte Bereich der Insel Ebe-Basyn-Sise werden der zweiten Hauptterrasse, dem Arga-Komplex, zugeordnet. Khardang-Sise gehört zu den Erosionsresten der dritten Terrasse. Außerdem befinden sich im Gebiet zahlreiche Auen verschiedenen Niveaus, d.h. Teile der ersten Terrasse. Abbildung 11 zeigt ein digitales Geländemodell des Hauptuntersuchungsgebietes.



**Abb.11:** Digitales Geländemodell des Hauptuntersuchungsgebietes

Als Arga-Komplex werden alle Bereiche der zweiten Terrasse bezeichnet, die eine für diese Einheit spezifische Geomorphologie zeigen. Die Entstehung wird kontrovers diskutiert. Sie schwankt von glazial (GROSSWALD 1998), periglazial (GALABALA 1997) sowie fluvial (GRIGORIEV 1993). ARE & REIMNITZ (2000) sehen die Entstehung im Zusammenhang mit der Entstehung der dritten Terrasse. Durch tektonische Blockhebung im Mittelpleistozän kam es nicht zur Bildung des Eiskomplexes. In Anlehnung an SCHWAMBORN et al. (2000, 2002) wird die Entstehung des Arga-Komplexes hier als

fluviale Bodenfracht eines Paläo-Flusssystemes gesehen. Geochronologische Untersuchungen zeigen, dass der obere Bereich der mächtigen Sandsequenzen der Insel Arga zwischen 14500 und 10900 BP abgelagert wurde (KRBETSCHKE et al. 2002). Dies geschah innerhalb einer kontinentalen Umwelt wie weitere sedimentologische, mineralogische und geophysikalische Untersuchungen auf dem Arga Komplex zeigen. Hohe Sedimentationsraten sowie fehlende Feinsedimente und organische Materialien sind typisch für die Ablagerungen. Daraus lässt sich die Sedimentation innerhalb eines verzweigten Flusssystemes schließen. Damit verbunden sind saisonal hohe Abflussraten (SCHWAMBORN et al. 2002). Während des postglazialen Wärmeoptimums (ca. 7000 BP) wurde die starke fluviale Sedimentation abgelöst von Thermokarstprozessen und äolischen Aktivitäten. Es entstand das typische Thermokarstrelief des Arga-Komplexes. Es wird charakterisiert durch ausgedehnte elliptisch geformte Senken (Alase), die eine submeridionale Orientierung aufweisen. In den Senken befinden sich Seen mit einer für den Arga-Komplex typischen Form (s. Abb.12). Flache, weniger als 2m tiefe, bis zu 1km breite Seebereiche umgeben zentral gelegene, lang gestreckte, tiefe Seebecken. Der Nikolay-See ist mit einer Tiefe von etwa 30 m der größte See der Insel Arga (SCHWAMBORN et al. 2000). Die Tiefen der Seen schwanken zwischen 10 und 30m (GRIGORIEV 1993). Die geomorphologische Erscheinung der Oberfläche des Arga-Komplexes wird als typisches Thermokarstrelief gesehen. Allerdings gibt es keine Erklärung für die Tiefe der Seen, da der Gehalt des Untergrundeises auf Arga keine so tiefe Subsidenz zulässt und es auch keine Beweise für die Existenz höherer Eisgehalte in der Vergangenheit gibt (ARE & REIMNITZ 2000). Heute wird eine relative Stabilität der Oberfläche des Arga-Komplexes angenommen. Die Flächen der Seen haben sich stark verringert und nehmen weiter ab. Im Bereich vieler Seen sind konzentrische Uferlinien zu beobachten, die eine Absenkung der Seewasserspiegel belegen (GALABALA 1987).

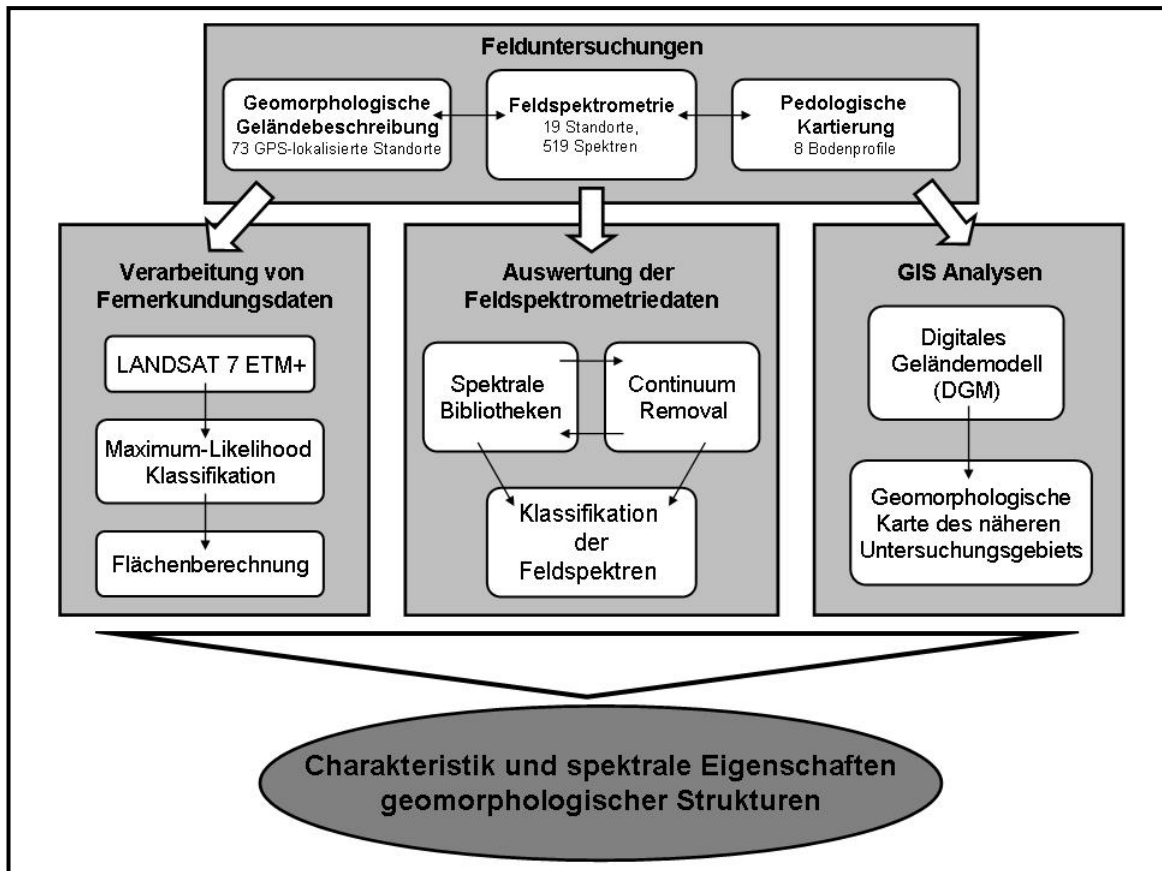
Nach KUTZBACH & KURCHATOVA (2002) ist eine Dreigliederung der Landschaft des Arga Komplexes möglich. Sie ist gekennzeichnet durch hügelige Oberflächen mit maximalen Höhen von 25 m, die begrenzt werden durch flach geneigte Hänge. Diese Bereiche wechseln sich mit ausgedehnten Thermokarstdepressionen und –seen ab, welche durch steile Hang- und Schulterbereiche begrenzt werden. Das polygonale Mikrorelief der Landschaft ist besonders auf den Gipfelbereichen der hügeligen Oberflächen undeutlich ausgeprägt. Häufig befindet sich der Grundwasserspiegel innerhalb der Polygonzentren und Thermokarstdepressionen unter der Bodenoberfläche. Hier wird die Vegetation dominiert durch Seggen und Moose (z.B.: *Carex aquatilis*, *Eriophorum scheuchzeri*, *Oncophorus wahlenbergii*, *Andreaea rupestris*), aber auch Flechten und Zwergsträucher. Liegt der Wasserspiegel über der Bodenoberfläche, oder sind Polygontümpel vorhanden, findet man vor allem Seggen und feuchtigkeitsliebende Gräser (z.B.: *Carex aquatilis*,

*Arctophylla fulva*, *Dupontia fisheri*). Auf den steilen Schultern und Hangbereichen sind nach KUTZBACH & KURCHATOVA (2002) keine Eiskeilpolygone zu finden, dagegen unsortierte Frostmusterstrukturen mit Durchmesser von etwa 0,5m. Die Vegetation ist spärlich und besteht vor allem aus Flechten (z.B.: *Ochrolechia frigida*) und Pflanzen, die auf trockene Bodenverhältnisse hinweisen (z.B.: *Cassiope tetragona*, *Salix nummularia*).



**Abb.12:** Oberfläche und typische Thermokarstseen des Arga Komplexes (Foto: V.Rachold)

## 4. Material und Methoden



**Abb.13:** Schema der Methoden, Arbeitsschritte und verwendeten Daten innerhalb der vorliegenden Diplomarbeit

### 4.1. Felduntersuchungen

Die Feldarbeit zur vorliegenden Diplomarbeit wurde vom 08.08 – 07.09.2005 während der Deutsch-Russischen Expedition „LENA 2005“ im Lena-Delta durchgeführt. Schwerpunkte waren die Feldspektrometrie, die Charakterisierung von Oberflächenparametern wie Vegetationsbedeckung und Geomorphologie sowie die Kartierung der Pedologie an einigen ausgewählten Standorten.

#### 4.1.1. Feldspektrometrie

Insgesamt wurden an 19 verschiedenen Standorten im Lena-Delta Gebiet feldspektrometrische Messungen vorgenommen. Davon befanden sich 4 Standorte auf der Insel Samoylov und 2 Standorte auf der Insel Kurungnakh-Sise im zentralen Deltagebiet. Weiterhin wurden innerhalb des Hauptuntersuchungsgebietes im nordwestlichen Delta 2 Standorte auf der Insel Turakh-Sise und 11 Standorte auf der Insel Ebe-Basyn-Sise untersucht (vgl. Abb.11). Dazu wurde ein Batterie betriebenes, transportables Feldspektrometer vom Typ ASD FieldSpec®FR genutzt (Analytical Spectral Devices 2004) (Abb.14). Im Kapitel 2.4.5. wurde bereits die allgemeine Funktionsweise

des Gerätes beschrieben. Zudem werden in Tabelle 1 einige Angaben zu gerätetechnischen Details gemacht. Die Daten wurden während der Messung mit einem an das Spektrometer angeschlossenen Feldrechner aufgenommen. Mit Hilfe der Steuersoftware RS<sup>3</sup>™ wurde der Messvorgang vorbereitet (Gerätekalibration, Referenzierung) sowie anschließend durchgeführt und aufgezeichnet. Die Steuersoftware ermöglichte die Einstellungen zur genutzten Optik, zur Anzahl der gemittelten Messungen für ein aufgezeichnetes Spektrum sowie zur Art der Messung (möglich sind Messungen von Radianz [Strahlung], Irradianz [Strahlungsdichte] oder Reflexion). Die gewonnenen Einzelspektren wurden individuell nummeriert und separat in Dateien abgelegt. Um die komplexen Vegetationsverhältnisse der Tundraoberflächen besser zu mitteln, wurde bei dem Großteil der Messungen mit der *bare optic* und damit mit einem Öffnungswinkel von 24° gearbeitet. Dabei erfasst man bei einer Nadirmessung aus einer Höhe von einem Meter eine Kreisfläche mit etwa 0,2 m Radius.



**Abb.14:** Nutzung des FieldSpec®FR im Lena-Delta (August 2005). Referenzmessung mit einer Weißreferenztafel (Spectralon®) (im Bild unten) (Foto: G.Grosse)

Im Feld wurden Software-gesteuert jeweils 50 Messungen mit je ca. 0,1 Sekunden Dauer für ein gespeichertes Einzelspektrum gemittelt. So konnten unter Feldbedingungen verstärkt auftretende Hintergrundstörungen reduziert und das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessert werden. Durch Bewegung während der Aufzeichnung der 50 Einzelmessungen vergrößert sich zudem die Aufnahmefläche für ein Spektrum



(CHABRILLAT et al. 2003, SALISBURY 1998). Je nach Bewegungsgeschwindigkeit variiert somit die Größe der in einem Spektrum gemittelten Flächeneinheit entlang der Bewegungsrichtung.

Die Voreinstellungen des Gerätes für die Felduntersuchungen wurden entsprechend vorangegangener Testmessungen und der Hinweise von im Umgang mit dem Feldspektrometer erfahrenen Mitarbeitern des Geoforschungszentrum Potsdam getroffen. Gemessen wurde jeweils die absolute Reflexion einer Oberfläche. Zur Kalibrierung und Referenzierung des Gerätes wurde ein 25,4 x 25,4 cm großes Spectralon® (Labsphere, Inc.) als Weißreferenz genutzt (s. Abb.14). Bei der Messung der solaren Strahlung über der Weißreferenztafel erhält man eine theoretisch hundertprozentige Reflexion über das gesamte gemessene elektromagnetische Spektrum. Nach der Weißreferenzierung wird das Zielspektrum automatisch durch das Spektrum der Weißreferenz dividiert. Durch diese Normierung kann das Spektrum des gemessenen Objektes direkt mit anderen Spektren verglichen werden. Zur Anpassung an häufig wechselnde Lichtverhältnisse sowie zur Minimierung atmosphärischer Störungen wurde das Gerät vor jedem neuen Messzyklus bzw. etwa alle 30 Minuten neu referenziert und kalibriert. Während der Messungen und der Kalibrierung wurde darauf geachtet, einen freien Standpunkt senkrecht zur Sonneneinstrahlung einzunehmen, so dass Beschattungen des Zielobjektes verhindert und Reflexionen von der messenden Person minimiert wurden. Detaillierte und weiterführende Informationen zu Grundlagen und Durchführung feldspektrometrischer Messungen liefern u.a. ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES (2004), CHABRILLAT et al. 2003, CURTISS & GOETZ (1994), MILTON (1987) und SALISBURY (1998).

Im Feld wurden Punktmessungen und Profilmessungen durchgeführt. Die Punktmessungen bestanden aus jeweils 2 gemessenen Spektren á 50 gemittelte Einzelmessungen an einem konkreten Standort. Die Profilmessungen bestanden aus kontinuierlichen Messungen, die während der Bewegung über eine gelaufene Strecke aufgenommen wurden und je nach Oberflächensituation verschiedene Profillängen aufweisen.

Die Spektralaufnahmen wurden möglichst an sonnigen, wolkenfreien Tagen und in der Regel um die Mittagszeit durchgeführt. Auf Grund häufiger schlechter Wetterbedingungen während der Feldkampagne musste allerdings auch auf spätere Tageszeiten ausgewichen werden, um eine repräsentative Anzahl an Daten zu erhalten. Für jede Spektralmessung wurden sowohl die Wetterbedingungen als auch die Oberflächeneigenschaften, Reliefsituation und Vegetationsbedeckung beschrieben und dokumentiert. Weiterhin wurden GPS-gestützt die Koordinaten der einzelnen Standpunkte sowie die Start- und Endpunkte der Profile ermittelt. Die Messstandorte sind im Anhang 1 zusammengefasst.

### **4.1.2. Geomorphologische Geländebeschreibungen und pedologische Kartierungen**

Für insgesamt 73 GPS-lokalisierte Standorte wurde die geomorphologische Situation und Oberflächencharakteristik beschrieben und dokumentiert. Davon befanden sich 67 Standorte im Hauptuntersuchungsgebiet auf den Inseln Turakh-Sise, Ebe-Basyn-Sise und Khardang-Sise (vgl. Abb.8). 6 weitere Standorte befinden sich im südlichen Delta auf den Inseln Samoylov und Kurungnakh-Sise. Die dokumentierten Oberflächenparameter waren: Relieftyp, geschätzte Hangneigung, Exposition, Abschätzung der Drainagesituation, Hauptvegetationstyp, Schätzung des Bedeckungsgrades der Vegetation und Messung der saisonalen Auftautiefe. Eine Zusammenfassung der Standorte wird im Anhang 2 gegeben. Für alle Standorte wurde eine Bilddatenbank mit insgesamt mehr als 300 Fotos zusammengestellt.

Während der geomorphologischen Felderkundungen wurden 8 Bodenprofile detailliert kartiert. Davon befanden sich 2 Profile auf der Insel Samoylov, 1 Profil auf der Insel Ebe-Basyn-Sise und 5 Profile innerhalb einer Catena auf der Insel Turakh-Sise. Die Aufnahme erfolgte mittels Grabung und am Spatenstich und wurde mit Hilfe eines am AWI-Potsdam entworfenen Aufnahmebogens nach den Kriterien der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 4 (AG BODEN 1994) dokumentiert. Die Böden wurden horizontweise beprobt. Zum Nachweis reduzierender Bedingungen wurde als Farbindikator  $\alpha$ -Dipyridil verwendet. Zur Beschreibung der Bodenfarbe wurde die Farbtabelle nach MUNSELL (1975) benutzt. Da in der deutschen Systematik der pedogenetische Bezug zum Permafrost fehlt, erfolgten die Horizontbezeichnungen parallel zur KA 4 nach der US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2003). Zur Klassifikation der Bodentypen wurde zusätzlich zur KA 4 und US Soil Taxonomy die World Reference Base (FAO 1998) verwendet.

## **4.2. GIS-Analysen**

Im Vorfeld der Expedition wurde mit Hilfe des Topogrid-Moduls der GIS-Software ArcGIS™ 9.0 (Firma ESRI) ein digitales Geländemodell (DGM) in Form eines Raster-Grids erstellt. Als Grundlage dienten manuell digitalisierte Höheninformationen aus russischen topographischen Karten im Maßstab 1:100.000, die bereits durch Mitarbeiter des AWI Potsdam gescannt und georeferenziert wurden. Die georeferenzierten Karten liegen im Gauss-Krüger-Koordinatensystem Pulkovo 1942 Zone 21 mit dem Datum Krassowski 1940 vor. In die Berechnung des DGM flossen Höhenlinien, Höhenpunkte, Kliffhöhen, Wasserspiegellhöhen von Seen, Deltakanälen und Flüssen als Höheninformationen ein. Weiterhin wurden für die Modellierung eines hydrologisch korrekten Geländemodells die räumliche Ausdehnung von Seen und die Fließrichtung von

Flüssen berücksichtigt. In Anlehnung an die Pixelgröße der Landsat-7 ETM+ Daten (Tab.1) wurde als Zellgröße des DGM 30m gewählt.

Mit Hilfe des DGM sowie den verfügbaren Satellitendaten und den gewonnenen Erkenntnissen aus den geomorphologischen Felduntersuchungen wurde eine geomorphologische Karte für das Hauptuntersuchungsgebiet erstellt. Neben Landsat-7 Bilddaten konnte besonders die visuelle Auswertung eines hoch aufgelösten panchromatischen Corona-Satellitenbildes (Auflösung: 2,5 m; Aufnahmezeitpunkt: 22.06.1964) gut für die detaillierte geomorphologische Interpretation genutzt werden. Neun geomorphologische Einheiten konnten interaktiv im GIS unterschieden und kartiert sowie deren Flächenanteile berechnet werden.

Des Weiteren wurde mit Hilfe der GIS-Software eine einfache Bodenkarte für eine Thermokarstsenke auf der Insel Turakh-Sise im Hauptuntersuchungsgebiet erstellt. Die Digitalisierung erfolgte an einem CHRIS/PROBA Satellitenbild (Aufnahmezeitpunkt: Juni 2005). Die spektral hoch aufgelösten CHRIS/PROBA Daten (s. Tab.1) lassen eine sehr genaue Differenzierung verschiedener Oberflächentypen zu. Zur Abgrenzung der pedologischen Einheiten wurden die eigenen Erkenntnisse aus den intensiven Felderkundungen der Thermokarstsenke und den Bodenkartierungen innerhalb des Alases verwendet. Außerdem wurden Erkenntnisse aus vorangegangenen Bodenuntersuchungen auf dem Arga-Komplex und anderer Deltaregionen herangezogen (KUTZBACH & KURCHATOVA 2002, PFEIFFER et al. 2002).

### **4.3. Verarbeitung von Fernerkundungsdaten**

#### **4.3.1. Datenmaterial**

Für das Hauptuntersuchungsgebiet wurden Ausschnitte von Landsat-7 ETM+ Satellitenbilddaten für die Erstellung einer Landbedeckungsklassifikation sowie den Vergleich mit den Feldspektrometrie-Daten bearbeitet. Technische Angaben zu diesen Satellitendaten wurden bereits im Kapitel 2.4.4. und Tab.1 gemacht. Das Landsat-7 Bild wurde am 26. Juli 2001 aufgenommen. Bereits im Vorfeld dieser Arbeit wurden die Daten durch Mitarbeiter des AWI Potsdam radiometrisch korrigiert und auf das Koordinatensystem UTM (WGS-84) georeferenziert.

#### **4.3.2. Klassifikation der Satellitendaten**

Klassifikationen werden zur Differenzierung von Objekten in Satellitenbildern und zur quantitativen Analyse der Bilddaten durchgeführt. Mit automatischen Klassifikationen werden Bildpixel innerhalb eines Satellitenbildes anhand der Ähnlichkeit ihrer spektralen Signatur in Objektklassen zusammengefasst (RICHARDS & JIA 1999). Dies kann durch unüberwachte und/oder überwachte Klassifikationen erfolgen. Bei der unüberwachten



Klassifikation werden die Bildpixel auf Grund statistischer Parameter automatisch in Klassen ähnlicher spektraler Eigenschaften unterteilt. Die unüberwachte Klassifikation erfordert kein Vorwissen des Bearbeiters zu den einzelnen Klassen und basiert rein auf den im Bild enthaltenen Informationen. Im Gegensatz dazu werden bei der Durchführung einer überwachten Klassifikation vorher bekannte Klassen definiert und mit Trainingsgebieten im zu klassifizierendem Bild belegt. Die Klassendefinition ergibt sich aus der Interpretation unabhängiger Datensätze, z.B. Geländeerkundungen oder thematische Karten. Danach werden sämtliche Bildpixel auf Grund der Ähnlichkeit ihrer spektralen Eigenschaften und einer ausgewählten statistischen Methode den definierten Klassen zugewiesen. Häufig wird eine unüberwachte Klassifikation vor einer überwachten Klassifikation durchgeführt, um zusätzliche Informationen über die spektrale Zusammensetzung des Bildes zu erfahren und eine weitere Grundlage für die Auswahl der Trainingsgebiete zu schaffen. Zur Durchführung von Klassifikationen gibt es zahlreiche methodische Ansätze (ALBERTZ 2001, RICHARDS & JIA 1999).

Im Verlauf einer am AWI Potsdam durchgeführten Diplomarbeit zur Bilanzierung von Methanemissionen wurde eine überwachte Klassifikation für das gesamte Lena-Delta anhand von drei Landsat-7 ETM+ Szenen durchgeführt (SCHNEIDER 2005). Im Vergleich zu dieser vorhandenen Satellitenbildklassifikation wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine überwachte Maximum-Likelihood Klassifikation an einem Landsat-7 ETM+ Bildausschnitt für das Hauptuntersuchungsgebiet erstellt, um verschiedene geomorphologische Strukturen und Oberflächentypen zu differenzieren. Zur Durchführung der Klassifikation wurde die Software ENVI<sup>TM</sup> (Environment for Visualizing Images) der Firma RSI in der Version 4.1 verwendet. Als Grundlage für die Definition der Klassen sowie für die Auswahl der Trainingsgebiete wurden die Kenntnisse aus den eigenen Felderkundungen (s. Kap.4.1.) herangezogen und eine unüberwachte Klassifikation mit der ISODATA Cluster Methode durchgeführt (RICHARDS & JIA 1999, ENVI 2004). Für die überwachte Klassifikation wurde das Maximum-Likelihood Verfahren genutzt. Die Zuordnung eines Pixels zu einer Klasse basiert dabei auf der aus statistischen Parametern abgeleiteten größten Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit erfolgt nach den Daten der zuvor festgelegten Trainingsgebiete. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Messdaten der Pixel jeder Klasse im Merkmalsraum eine Normalverteilung um den Klassenmittelpunkt aufweisen. Im Gegensatz zum ebenfalls häufig verwendeten Minimum-Distance Verfahren werden bei der Maximum-Likelihood Klassifikation auch die unterschiedlichen Streubereiche der Messwerte berücksichtigt (ALBERTZ 2001). Der Vorteil der Methode ist, dass nahezu alle Pixel mit sehr guter Genauigkeit einer Klasse zugewiesen werden können.

Die Trainingsgebiete wurden nach 15 vordefinierten Klassen ausgewählt. Die spektrale Trennbarkeit der Pixel aus den Trainingsgebieten wurde mit Hilfe des *n-dimensional visualiser* Moduls im ENVI™ überwacht und verbessert (ENVI 2004, GROSSE et al. 2006). Dazu wurden besonders stark von der klassenzugehörigen Punktwolke abweichende Pixel im 6-dimensionalen Raum der 6 multispektralen Landsat-7-Spektralbänder (1 - 5 und 7) aus den Trainingsgebieten ausgeschlossen.

Eine detaillierte Genauigkeitsbewertung der Klassifikationsergebnisse (*accuracy assessment*) wurde für die Klassifikation nicht durchgeführt. Auf Grund der Feldkenntnisse und nach einem Vergleich mit hochauflösenden Corona-Bildern wird die Klassifikation aber als gut eingeschätzt.

Abschließend wurden die Gesamtflächen der Klassen im Hauptuntersuchungsgebiet berechnet.

## **4.4. Verarbeitung der Feldspektrometriedaten**

### **4.4.1. Spektrale Bibliotheken**

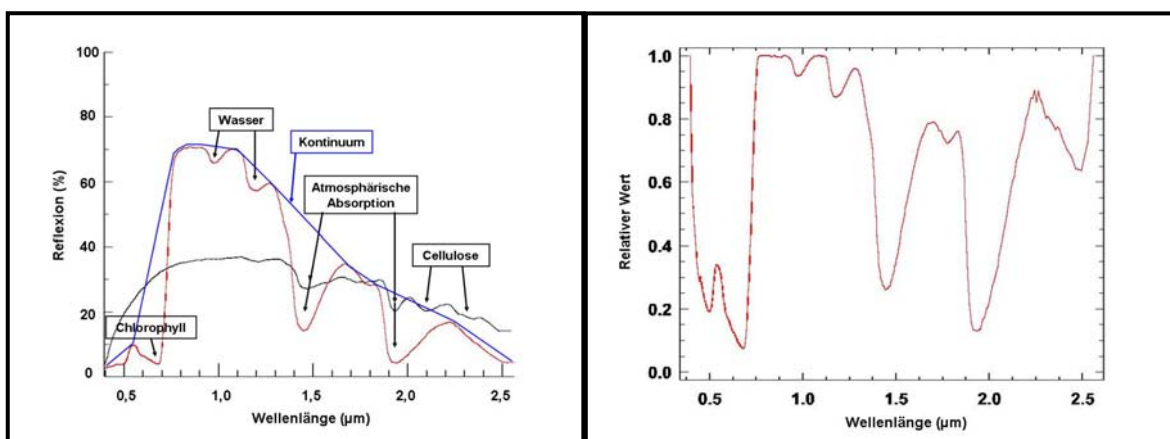
Die insgesamt 519 Einzelspektren von 19 Standorten wurden mit Hilfe der Software ENVI™ in spektralen Bibliotheken zusammengestellt. Eine erste Bearbeitung der Spektren erfolgte mit Hilfe einer am GFZ-Potsdam entwickelten Software, mit der die Spektralkurven einem Glättungsverfahren zur Korrektur atmosphärischer Störungen unterworfen wurden und die gerätespezifischen Detektorsprünge bei 651/652 nm und 1451/1452 nm entfernt wurden. Weiterhin wurden die Bereiche der starken atmosphärischen Wasserabsorptionen zwischen 1350 – 1415 nm und 1800 – 1970 nm sowie der ebenfalls stark gestörte Bereich ab etwa 2400 nm für die weitere Darstellung der Spektren maskiert.

Die Punkt- und Profilmessungen der einzelnen Standorte wurden nach Untersuchungsgebiet zunächst in 4 Spektralbibliotheken zusammengefasst. Die je Standort doppelt ausgeführten Punktmessungen (s. Kap.4.1.1.) wurden mit Hilfe der ENVI™ Funktion *spectral-math* arithmetisch gemittelt und das resultierende Spektrum nach der spezifischen Standortcharakteristik umbenannt. Eine weitere Spektralbibliothek wurde für die Profilmessungen aller Standorte erstellt, um die einzelnen Oberflächentypen besser miteinander vergleichen zu können. In diese Bibliothek ist je Profil ein aus der gesamten Profilmessung arithmetisch gemittelt Spektrum eingegangen. Zwei weitere kleinere Bibliotheken setzen sich aus den gemittelten Spektren verschiedener Polygontypen sowie aus Punktmessungen typischer Oberflächen und Pflanzenarten zusammen. Mit Hilfe der Spektralbibliotheken konnten die Spektren nach den dazugehörigen Oberflächen und Gebieten geordnet und verglichen werden. Zur Auswertung der Spektraldaten wurden die

spektralen Signaturen, d.h. der Verlauf der Spektralkurven sowie die Absorptions- oder Reflexionseigenschaften, visuell gegenübergestellt und verglichen.

#### 4.4.2. Continuum Removal

Deutliche Unterschiede in spezifischen Absorptionsbereichen ermöglichen eine Differenzierung der Spektren und damit der Oberflächentypen. Für die Auswertung der Spektraldaten wurde die ENVI™ Standardfunktion *continuum removal* benutzt, mit deren Hilfe bestehende individuelle Spektralkurvenmerkmale wie z.B. die Kurvenform in Absorptionsbereichen betont dargestellt werden können. Diese Methode findet häufig in der Geologie und Mineralogie Anwendung, aber auch bei der Unterscheidung von Vegetationstypen (SCHMIDT & SKIDMORE 2003, VAN DER MEER 2004). Die Methode versetzt das Kontinuum einer spektralen Reflexion. Dies resultiert in einer Kurve mit Werten zwischen 0 und 1. Das Kontinuum ist eine konvexe Hülle, die über ein Spektrum gelegt wird (s. Abb.15). Diese Linie verbindet alle lokalen Reflexionsmaxima des Spektrums. Die ersten und letzten Werte des dargestellten Kontinuums werden normiert und auf den relativen Wert 1 gesetzt. Die dazwischen liegenden individuellen Absorptionseigenschaften werden als Quotient des Kontinuums überhöht dargestellt (CLARK & ROUSH 1984, ENVI 2004). Für die Auswertung der Feldspektren wurde die Technik auf verschiedene Absorptionsbereiche angewendet. So ist es zum Beispiel möglich, die Fitness und Vitalität der Vegetation anhand von Chlorophyllabsorptionsbereichen oder den Wassergehalt der Blätter sowie die Feuchtigkeit einer Oberfläche anhand von Wasserabsorptionsbereichen zu vergleichen. In Abbildung 15 sind typische Absorptionseigenschaften grüner und trockener Vegetation dargestellt.



**Abb.15:** Links: Darstellung der Spektren und Absorptionseigenschaften grüner Vegetation (rote Linie) und trockener Vegetation (schwarze Linie) sowie vereinfachte Darstellung des Kontinuums (blaue Linie) über das gesamte Spektrum grüner Vegetation. Spektren zusammengestellt aus USGS Spectral Library (Clark et al. 2004) Rechts: Gesamtes Spektrum der grünen Vegetation nach einem continuum removal. Erklärung im Text

### 4.4.3. Klassifikation der Feldspektren

Die Klassifizierung der geomorphologischen Oberflächen anhand ihrer spektralen Signaturen wurde an der Spektralbibliothek der Profile vollzogen. Dazu wurden die 29 Spektren der Bibliothek zunächst in eine Graustufen-Bilddatei mit dem Format 29 x 1 x 2151 (Spalten x Zeilen x Bänder) umgewandelt. An diesem künstlich erzeugten hyperspektralen Bilddatensatz wurde in ENVI™ eine unüberwachte Klassifikation mit der ISODATA Cluster Methode durchgeführt (vgl. ENVI 2004). Entsprechend des Spektralbereichs von CHRIS/PROBA Satellitendaten (s. Tab.1) wurde nur der Wellenlängenbereich von 400 bis 1020nm klassifiziert. Testklassifikationen am gesamten Spektralbereich der Feldspektren haben gezeigt, dass keine signifikanten Unterschiede im Klassifikationsergebnis entstehen. Die Spektren wurden durch das automatische Verfahren in 12 Klassen gegliedert. Nachfolgend wurde das unüberwachte Klassifikationsergebnis in einer visuellen Auswertung der Spektren mit Hilfe der *continuum removal* Technik überprüft sowie die Klassen gegebenenfalls modifiziert und nach geomorphologischen Einheiten und Strukturen gegliedert.

### 4.5. Weitere verwendete Daten

Zur Ergänzung und Diskussion der geomorphologischen Charakteristiken wurde im Labor des AWI Potsdam eine chemische und physikalische Analytik von Bodenprofilen und Oberflächenproben durchgeführt. Analysiert wurden Korngrößenverteilung, der Gehalt von Kohlenstoff und Stickstoff sowie der pH-Wert. Die Probenvorbereitung erfolgte nach Laborstandards des AWI Potsdam. Die Korngrößenverteilung wurde an vorher auf 1mm abgeseibten Proben mit einem Laserparticle Analyzer LS 200 (Beckman Coulter®) ermittelt. Die Bestimmung der Gesamtgehalte von Kohlenstoff (TC) und Stickstoff (TN) erfolgte mit einem Elementaranalysator Vario EL (Elementar Analysensysteme GmbH). Organischer Kohlenstoff (TOC) wurde nach der Entkarbonatisierung mit 1,3 M HCl mit dem gleichen Gerät bestimmt. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte nach DIN 19684-1 mit 0,01 M CaCl<sub>2</sub> und einer pH-Einstabmesskette.

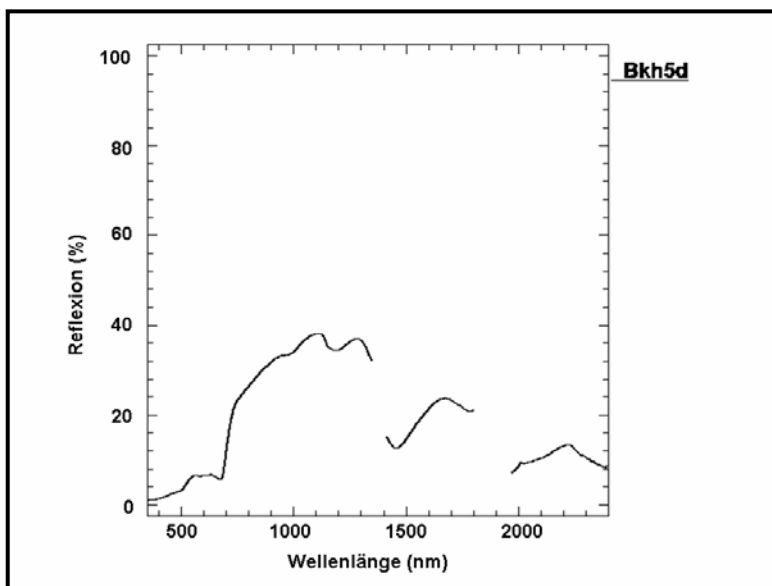
## 5. Ergebnisse

### 5.1. Ergebnis der Feldspektrometrie

#### 5.1.1. Klassifikation und Auswertung der Feldspektren

Das Ergebnis der Klassifikation der Feldspektren sind 12 verschiedene Oberflächenklassen. In diesen Klassen wurden 21 typische Profilspektren zusammengefasst, die verschiedene geomorphologische Einheiten und Strukturen repräsentieren. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Profil- und Punktmessungen der einzelnen Standorte befinden sich im Anhang 1. Auf Unterscheidungsmöglichkeiten und typische Absorptionsbereiche spektraler Signaturen wurde im Kapitel 2.4.3. sowie in Abbildung 15 eingegangen.

#### Klasse I, Oberfläche der 3.Terrasse (Abb.16):



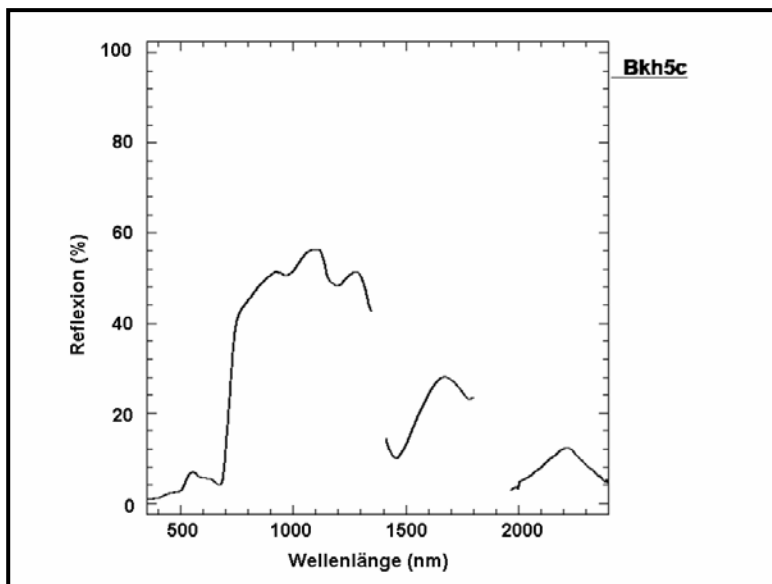
**Abb.16:** Spektrale Signatur der Klasse I

Die Klasse I repräsentiert die Oberfläche der 3.Terrasse des Lena-Deltas (Eiskomplex). Diese ist geprägt durch ein sehr ebenes Relief und eine im Vergleich zu den anderen Lena-Delta Terrassen relativ trockene Oberfläche. An der Oberfläche ist ein polygonales Muster kaum bis gar nicht zu erkennen. Die Vegetation wird stark von *Salix sp.* und Gräsern auf Moospolstern dominiert. In Abhängigkeit von kleinräumig wechselnden Oberflächenverhältnissen treten stellenweise Moose oder Gräser in den Vordergrund.

Dargestellt wird diese Klasse durch die Profilmessung Bkh5d auf der Insel Kurungnakh-Sise (Abb.18). Das Spektrum zeigt eine maximale Reflexion von 38%. Zwischen 540 und 640nm im sichtbaren Bereich des Lichts (VIS) ist ein lokales Maximum auf Grund der Grünreflexion bei 555nm zu erkennen. Die Rotreflexion bei etwa 650nm zeigt ein ähnliches lokales Reflexionsmaximum. Die Chlorophyllabsorption bei 680nm ist ebenfalls deutlich. Am Übergang vom VIS in den Bereich des nahen Infrarot (NIR) zwischen 690 –

740nm ist der steile Anstieg der Kurve, der so genannte *red edge* (s. Kap. 2.4.3.) zu erkennen. Der Anstieg erfährt einen Knick und eine Abflachung bei 740nm. Insgesamt zeigt die Kurve zwischen 800 und 1300nm einen kontinuierlich ansteigenden Verlauf. Zwischen 2000 und 2400nm zeigt das Spektrum eine geringere Reflexion. Auf Grund von Celluloseabsorption sind die leicht konkaven Formen im Kurvenverlauf zwischen 2000 – 2150nm und 2250 – 2400nm zu erkennen. Die Wasserabsorptionsbereiche zwischen 930 – 1030nm und 1120 und 1240nm sind relativ flach aber deutlich. Insgesamt deutet der Kurvenverlauf des Spektrums auf den großen Anteil trockener Vegetation auf der 3.Terrasse. Kennzeichnend dafür sind die mehr oder weniger flachen Wasserabsorptionsbereiche und der Verlauf der Kurven ab 2000nm. Die Tiefe der Chlorophyllabsorption und der Kurvenverlauf im VIS kann zudem als Maß für die geringere Vitalität der Vegetation angesehen werden.

### Klasse II, Alassenken der 3.Terrasse (Abb.17):



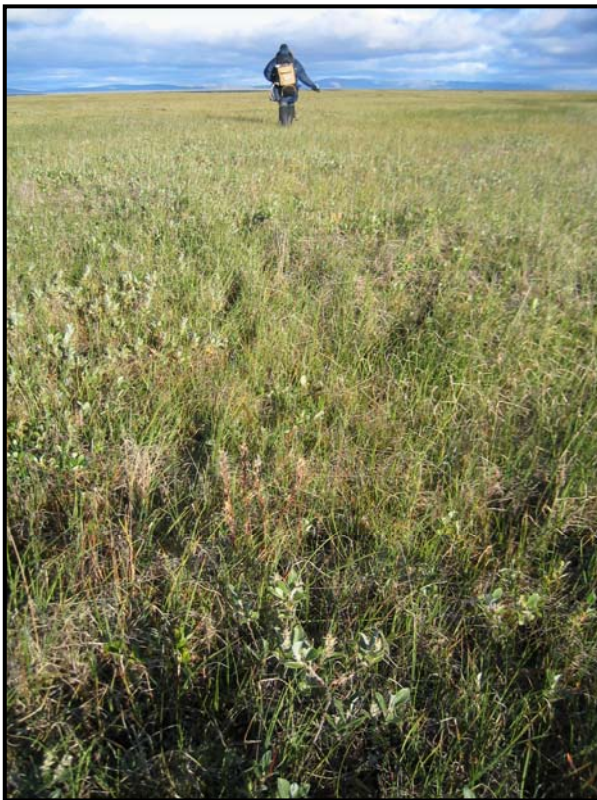
**Abb.17:** Spektrale Signatur der Klasse II

Diese Klasse repräsentiert einen speziellen Typ von Alassenken auf der 3.Terrasse. Mit dem Auslaufen eines ehemaligen Alassees ist die untersuchte Thermokarstsenke trocken gefallen. Die Oberfläche der Senke ist geprägt durch zahlreiche Thermokarsthügel und kann als gering feucht bezeichnet werden. Die Vegetation ist sehr frisch und wird von bis zu 50cm hohen grünen Gräsern dominiert. Auf den Thermokarsthügeln treten vermehrt *Salix sp.* in den Vordergrund, während die Gräser trockener werden (Abb.19).

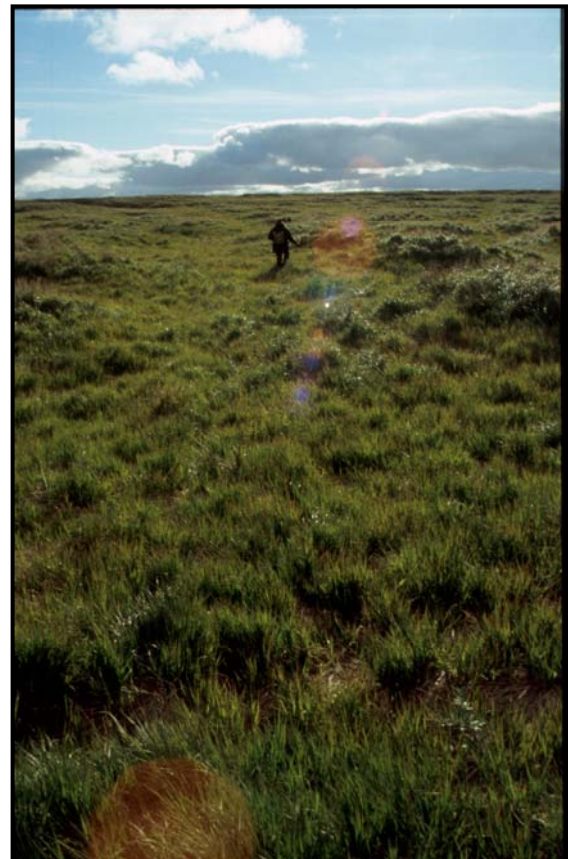
Repräsentiert wird diese Klasse durch die Profilmessung Bkh5c auf der Insel Kurungnakh-Sise. Die maximale Reflexion des Spektrums liegt bei 56%. Der Kurvenverlauf des Spektrums zeigt ein lokales Maximum im Bereich der Grünreflexion bei 555nm und einen starken, tiefen Abfall der Kurve im Rotbereich sowie eine tiefe Chlorophyllabsorption (620 – 680nm). Der *red edge* zwischen 690 und 740nm ist sehr hoch und steil. Bei 755nm ist

eine leichte Abflachung des Anstiegs zu erkennen. Zwischen 920 - 1300nm ist der Kurvenverlauf leicht in Richtung der langen Wellenlängen geneigt. Zwischen 2000 - 2400nm ist keine Celluloseabsorption dagegen eine steile, spitze Glockenkurve zu erkennen. Die Wasserabsorptionsbereiche, vor allem zwischen 1120 – 1240nm, sind deutlich ausgeprägt.

Die tiefe Chlorophyllabsorption, der sehr hohe steile Anstieg der Kurve (*red edge*) und der Verlauf zwischen 2000 – 2400nm machen die hohe Vitalität der Vegetation deutlich. Die Wasserabsorptionsbereiche und die hohe Reflexion deuten ebenfalls auf die frische Vegetation.



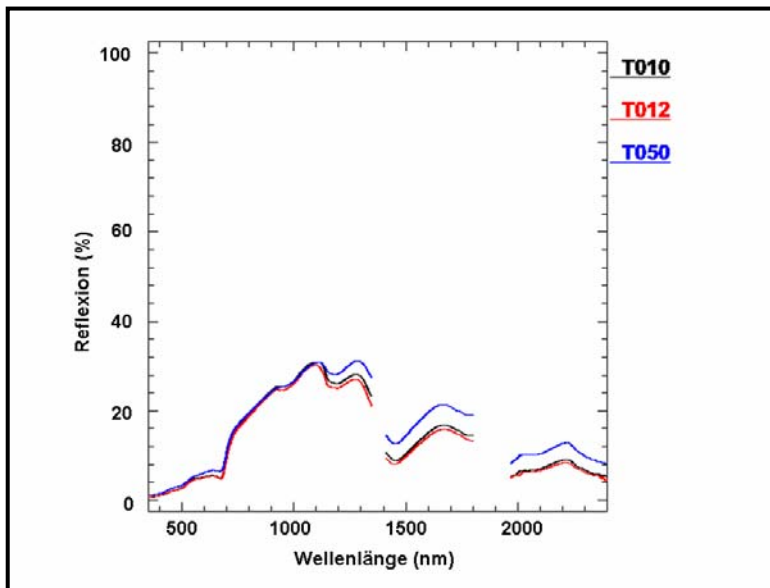
**Abb.18:** Oberfläche der 3.Terrasse (Klasse I)



**Abb.19:** Alassenke der 3.Terrasse mit zahlreichen Thermokarsthügeln (Klasse II)



### Klasse III, Polygonale Tundra der 2.Terrasse (Abb.20):



**Abb.20:** Spektrale Signaturen der Klasse III

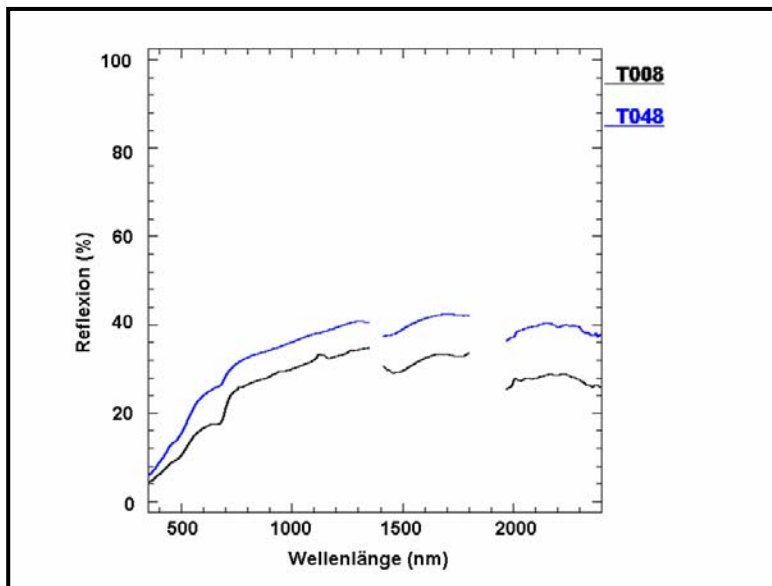
Klasse III repräsentiert eine typische polygonale Tundra auf der 2.Terrasse. Die teils orthogonalen *low-centre* Polygone sind undeutlich bis deutlich erkennbar. Eine undeutliche Polygonstruktur ist eher in den Alassenen der Terrasse verbreitet. Der Durchmesser einzelner Polygone erreicht mehr als 20m. Die Polygonzentren sind nass und enthalten teilweise stehendes Wasser oder Polygontümpel. Die Wälle der Polygone sind in der Regel besser drainiert und deshalb teilweise sehr trocken. Die Erhöhung der Wälle über den Polygonzentren ist teils undeutlich, kann aber anderenorts bis zu einem Meter betragen (Abb.22). Die Tiefe der saisonalen Auftauzone beträgt bis zu 45cm und ist in den Wällen etwas größer als in den Zentren. Die Vegetation in den Polygonzentren wird von Seggen, Gräsern sowie Moosen, wie *Sphagnum sp.* dominiert. Sie tritt teilweise lückenhaft auf. Die Wälle sind je nach Drainagesituation und Höhe durch trockene Moose, diverse Flechten, Kräuter, Zwergsträucher und eher weniger Gräser und Seggen geprägt.

Die Klasse wird durch die Profilmessungen T010, T012 und T050 auf der Insel Ebe-Basyn-Sise dargestellt. Die maximalen Reflexionen der Spektren liegen bei 31%. Die Kurvenverläufe im VIS sind flach, leicht ansteigend und zeigen relativ geringe Chlorophyllabsorptionen bei T010 und T012 und sehr geringe bei T050. Die Anstiege der Kurven bei etwa 700nm (*red edge*) sind kurz und vergleichsweise weniger steil. Der *red edge* des Spektrums T050 ist etwas in Richtung der kurzen Wellenlängen verschoben. Zwischen 920 – 1300nm sind die Kurvenverläufe von T010 und T012 subhorizontal, von T050 leicht ansteigend. Zwischen 2000 – 2400nm sind alle Kurven nur leicht gewölbt und zeigen bei 2000 – 2150nm sowie 2250 – 2400nm durch Celluloseabsorption beeinflusste konkave Formen. Die Reflexion des Spektrums T050 ist in diesem Bereich etwas höher. Die Wasserabsorptionsbereiche (930 – 1030nm, 1120 – 1240nm) sind relativ flach,



jedoch bei T010 und T012 tiefer. Im Allgemeinen werden die Verläufe und Absorptionsbereiche der Spektren durch die wenig vitale Vegetation und die eher trockenen Standortbedingungen der Polygonwälle dominiert. Deutlich ist dies im Spektrum T050 zu erkennen, welches durch eine Polygonstruktur mit sehr trockenen und hohen Wällen geprägt wird. Der hohe Anteil feuchter Polygonzentren ist an der relativ geringen Gesamtreflexion der Spektren zu erkennen.

#### Klasse IV, Sandflächen der 2.Terrasse (Abb.21):

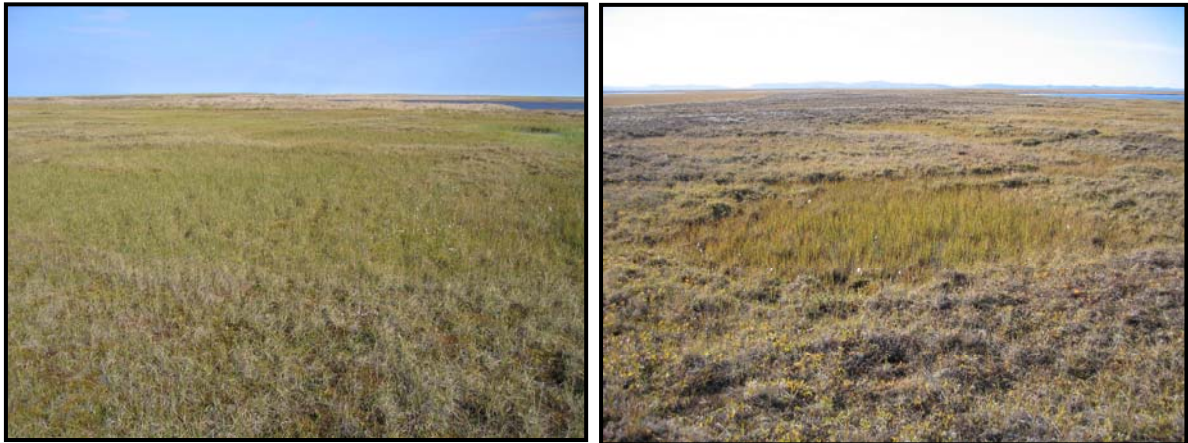


**Abb.21:** Spektrale Signaturen der Klasse IV

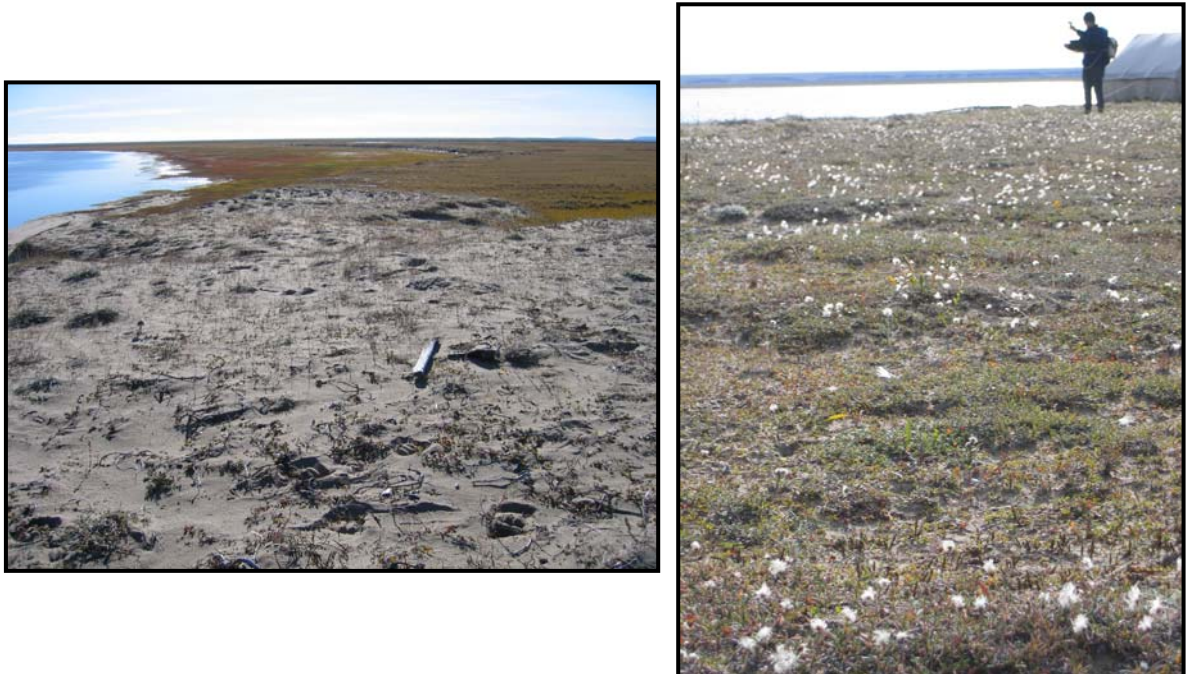
Diese Klasse repräsentiert größere Sandflächen der 2.Terrasse. Es handelt sich dabei um exponierte ebene Plateauflächen mit leichter Dünenbildung, die sich 5 – 8m über dem Wasserspiegel der Lena befinden. Diese Flächen dehnen sich vor allem landeinwärts von steilen Uferkliffs, den Hauptquellen des weisslich-gelben Sandes, aus (Abb.23). Der Untergrund dieser Flächen ist sandig, gut drainiert und sehr trocken. Der Bewuchs ist sehr spärlich und die Vegetationsbedeckung liegt bei 0 – 60%. Die saisonale Auftauzone liegt im Durchschnitt bei etwas mehr als 1m. Die Vegetation ist sehr niedrig (max. 20cm), trocken und besteht aus vereinzelt Flechten, Kräutern, Moosen, Zwergsträuchern und Gräsern.

Die Klasse wird durch die Profilmessungen T008 und T048 auf der Insel Ebe-Basyn-Sise charakterisiert. Die Vegetationsbedeckung bei T008 beträgt ca. 60%. Die Bedeckung bei T048 beträgt ca. 20%. Die Maxima der Gesamtreflexionen liegen bei 42% (T048) und 34% (T008). Die Spektren zeigen eine durchgängig ansteigende konvexe Form ohne größere lokale Maxima und Minima im Kurvenverlauf. Eine Chlorophyllabsorption (680 nm) ist kaum vorhanden. Der *red edge* (etwa 700nm) ist sehr kurz und undeutlich. Wasserabsorptionen sind nicht vorhanden. Eine geringe Absorption bei 2200nm, deutlich erkennbar im Spektrum T048 und weniger deutlich im Spektrum T008, ist möglicherweise

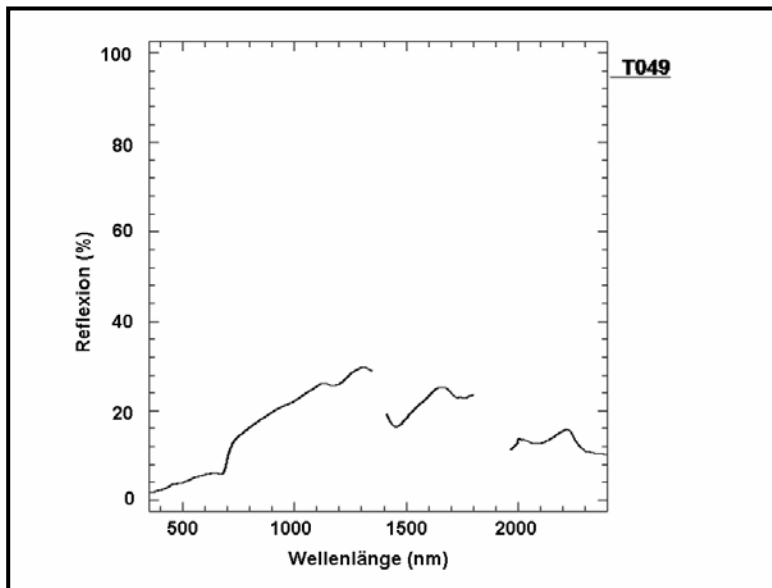
auf Tonminerale zurückzuführen (CLARK et al. 1990). Der Verlauf der Kurven, die nur kurzen steilen Anstiege der Spektren sowie erkennbare Tonmineralabsorptionen zeigen, dass die spektralen Signaturen vor allem durch die Reflexion der freiliegenden Sedimente beeinflusst werden. Mit geringerer Vegetationsbedeckung steigt außerdem die Reflexion auf diesen Sanden an, wie die Unterschiede zwischen den beiden Spektren zeigen. Fehlende Minima im Wasserabsorptionsbereich deuten auf die hohe Trockenheit der Oberflächen.



**Abb.22:** Polygonale Tundra der 2.Terrasse (Klasse III), *Links:* Standort T010, *Rechts:* Standort T050



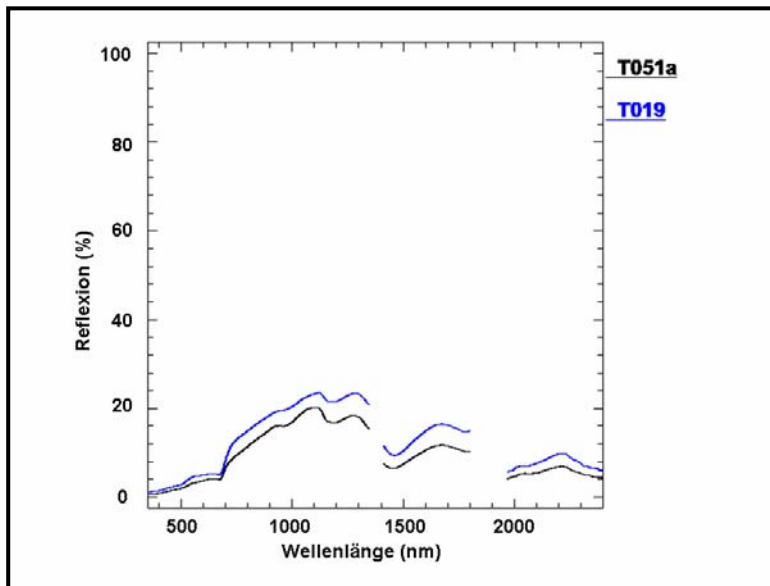
**Abb.23:** Sandflächen der 2.Terrasse (Klasse IV), *Links:* Standort T048, *Rechts:* Standort T008

**Klasse V, Alaswälle der 2.Terrasse (Abb.24):**

**Abb.24:** Spektrale Signatur der Klasse V

Die Klasse beinhaltet die spektrale Signatur von Alaswallen der 2.Terrasse. Die Thermokarstsenken sind durchschnittlich 6 – 8m in die Oberfläche eingetieft und von mehrere Zehnermeter breiten Randzonen umgeben. Diese teils leicht geneigten Plateau-Hangflächen sind durch eine sehr homogene Hummock-Oberfläche geprägt (Abb.26). Der Untergrund ist meist trocken, gut drainiert und sandig. Die sommerlichen Auftautiefen liegen im Durchschnitt bei 80cm. Die nahezu geschlossene Vegetationsdecke setzt sich aus trockenen Moosen, Krustenflechten und Kräutern zusammen. Sehr häufig sind *Ericaceae* wie *Cassiope tetragona* verbreitet. Auf den Frostbeulen (Hummocks) dominieren teils aufgebrochene Krustenflechten. Die Wuchshöhe der Vegetation ist sehr gering (2 – 10cm).

Diese Klasse wird repräsentiert durch das Profil T049 auf Ebe-Basyn-Sise. Das Maximum der Reflexion des Spektrums liegt bei 30%. Die Kurve ist im VIS (400 – 670nm) flach und leicht ansteigend. Die Chlorophyllabsorption (680nm) ist sehr gering. Der *red edge* der Kurve ist kurz und knickt bereits bei 730nm ein. Im Bereich des NIR von 730 – 1300nm zeigt die Kurve einen stetigen Anstieg in Richtung der langen Wellenlängen. Nur der Wasserabsorptionsbereich zwischen 1120 – 1240nm ist sehr flach. Zwischen 2000 – 2400nm sind die Bereiche der Celluloseabsorptionen deutlich an den konkaven Formen der Kurve zu erkennen. Der Kurvenverlauf des Spektrums, die geringe Wasser- und Chlorophyllabsorption und die deutliche Celluloseabsorption lassen zum einen die trockene, wenig vitale Vegetation als auch die spezielle Flechtenvegetation dieser Oberfläche erkennen. Die geringe Gesamtreflexion kann ebenfalls auf den großen Anteil von meist dunkel graubraun gefärbten Flechtenarten an der Vegetationsbedeckung zurückgeführt werden.

**Klasse VI, Alassenken der 2. Terrasse (Abb.25):**

**Abb.25:** Spektrale Signaturen der Klasse VI

Diese Klasse charakterisiert die Alassenken der 2. Terrasse. Die Oberflächenbedingungen innerhalb der Senken sind feucht bis nass, mit teilweise stehendem Wasser. In den Thermokarstsenken waren undeutliche Polygonstrukturen erkennbar. In diesem Fall werden die sehr feuchten Senkenbereiche von flachen, besser drainierten Polygonwällen unterbrochen (Abb.27). Die Vegetationsbedeckung ist geprägt durch *Salix sp.* neben Gräsern und Seggen auf Moospolstern. An sehr feuchten Stellen treten Seggen und Moose (*Sphagnum sp.*) in den Vordergrund. An trockeneren Stellen dominieren *Salix sp.* die Bedeckung. Die Vegetationsbedeckung ist nahe 100%, wird jedoch stellenweise durch stehendes Wasser unterbrochen. Die Wuchshöhe liegt im Durchschnitt bei 30cm. Die durchschnittliche saisonale Auftautiefe beträgt 30 – 40cm.

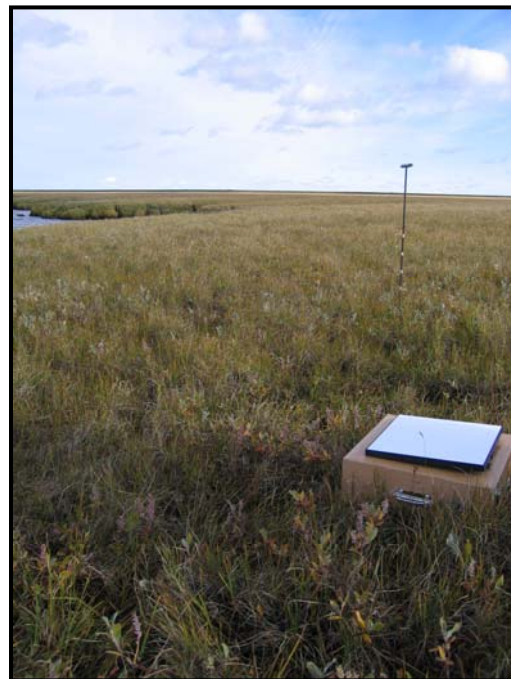
Die Profilmessung T051a auf Ebe-Basyn-Sise und T019 auf Turakh-Sise repräsentieren diese Klasse. Die maximalen Reflexionen liegen bei 20% (T051a) und bei 23% (T019). Beide Spektren verlaufen im sichtbaren Bereich des Lichtes (VIS) flach und leicht ansteigend. Das Spektrum T019 zeigt eine etwas höhere Grünreflexion (ca. 550nm). Die Bereiche der Chlorophyllabsorption (680nm) sind sehr flach. Am Übergang vom VIS in das NIR (etwa 700nm) sind die Anstiege beider Kurven sehr gering und verflachen sich bereits zwischen 720 – 730nm. Der Anstieg in diesem Bereich des Spektrums T051a ist darüber hinaus kaum ausgeprägt. Die Wasserabsorptionsbereiche des Spektrum T019 sind eher flach. Der Bereich der Wasserabsorption zwischen 1120 und 1240nm des Spektrum T051a ist deutlicher ausgeprägt. Zwischen 2000 – 2400nm zeigen beide Kurven nur flache Wölbungen und konkave Formen in den Bereichen der Celluloseabsorption. Nur die sehr geringe Reflexion beider Kurven deutet auf die im Allgemeinen sehr feuchten Oberflächenbedingungen der Standorte. Der Kurvenverlauf im



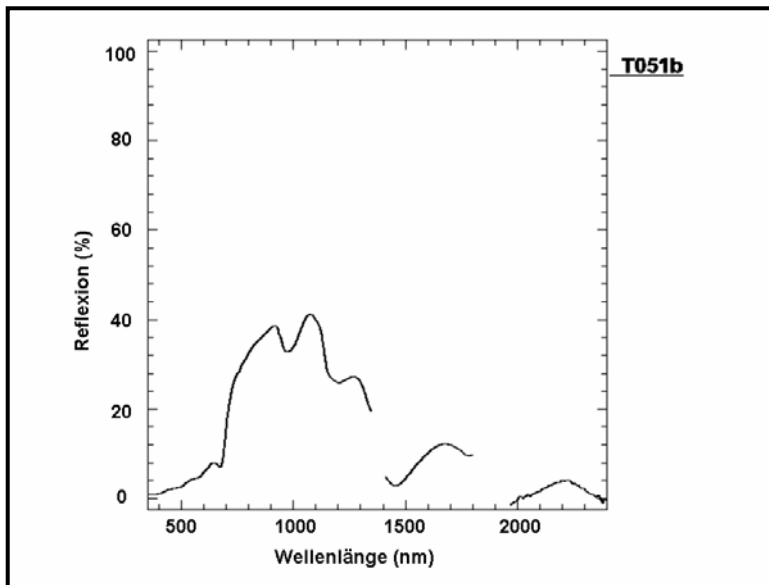
VIS, die sehr geringen Anstiege (*red edge*) und der Bereich zwischen 2000 – 2400nm lassen jedoch eine geringere Vitalität der Vegetation vermuten. Auch die im Vergleich niedrigen Wasserabsorptionen beider Kurven werden durch die Trockenheit der Vegetation beeinflusst. Der Unterschied der allgemeinen Kurvenverläufe beider Spektren kann einerseits auf die etwas trockeneren Verhältnisse am Standort T019 zurückgeführt werden und andererseits auf die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte. Die Vegetation des Standortes T051a war zum Aufnahmezeitpunkt bereits deutlich herbstlich eingefärbt.



**Abb.26:** Alaswälle der 2.Terrasse (Klasse V)



**Abb.27:** Alassenken der 2.Terrasse (Klasse VI), *Links:* Standort T051a, *Rechts:* Standort T019

**Klasse VII, verlandeter mooriger See, 2. Terrasse (Abb.28):**

**Abb.28:** Spektrale Signatur der Klasse VII

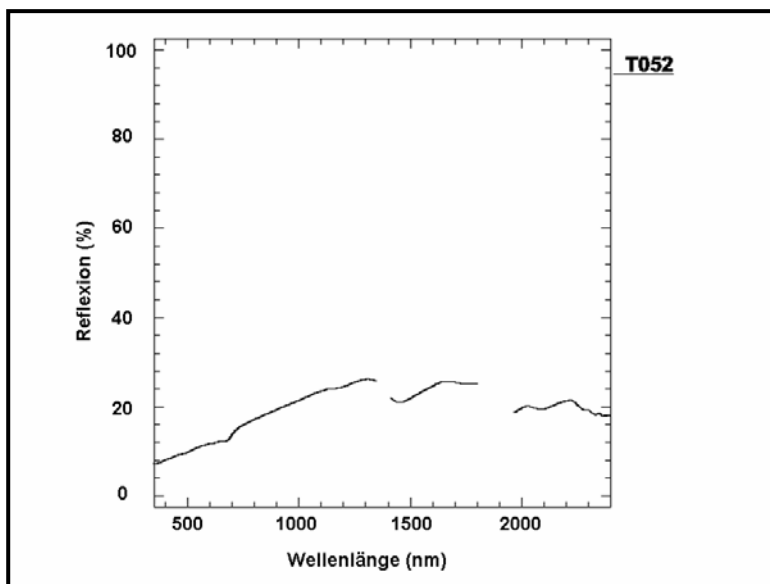
Diese Klasse repräsentiert die spektrale Signatur verlandeter, mooriger Flachwasserbereiche von Alasseen (Abb.29). Diese Oberfläche wird von rötlichen Gräsern (*Arctophylla sp.*), Wollgräsern und *Sphagnum sp.* dominiert. Die Wassertiefe liegt stellenweise bei 10cm, wobei die *Sphagnum*-Moose von Wasser überdeckt werden. Über die Wasseroberfläche ragende Moospolster sind bis auf die Permafrostoberfläche (etwa 40cm) durchnässt.

Die Klasse wird durch die Messung T051b auf Ebe-Basyn-Sise charakterisiert. Die Reflexion erreicht einen maximalen Wert von 41%. Im VIS zeigt der Verlauf der Kurve einen leicht konvexen Anstieg bis zu einem lokalen Maximum im Bereich der Rotreflexion (640nm). Eine Chlorophyllabsorption (680nm) ist gut zu erkennen. Der *red edge* (etwa 700nm) ist relativ hoch und steil. Der Anstieg erfährt eine leichte Abflachung bei 750 – 920nm. Auffällig tief sind die Wasserabsorptionen bei 920 – 1030nm und 1120 – 1240nm. Allgemein zeigt die Kurve zwischen 920 – 1300nm einen Abfall in Richtung der langen Wellenlängen. Zwischen 2000 – 2400nm ist eine flache Glockenform der Kurve zu erkennen. Die stark ausgeprägten Wasserabsorptionsbereiche deuten auf die sehr feuchten Oberflächenbedingungen und den hohen Anteil an nassen Moosen am Standort. Der steile Anstieg der Kurve, die vorhandene Chlorophyllabsorption, der Verlauf der Kurve zwischen 2000 – 2400nm und die mehr oder weniger hohe Reflexion lassen auf eine relativ vitale Vegetation schließen. Die rötliche Färbung der Gräser dominiert den reflektierten sichtbaren Bereich des Lichtes und wird durch das Reflexionsmaximum im Bereich des roten Lichtes deutlich.



**Abb.29:** Versumpfter Flachwasserbereich eines verlandenden Alassees (Klasse VII)

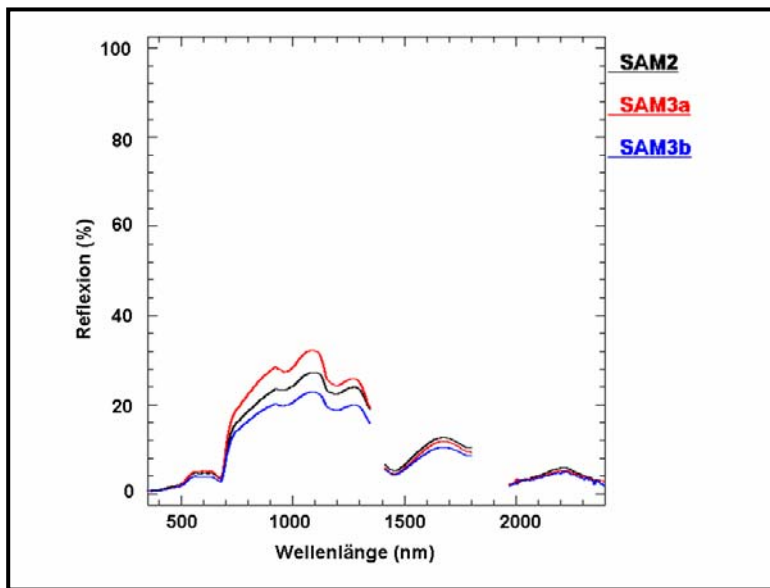
**Klasse VIII, Schwemmholzsaum, 1.Terrasse (Abb.30):**



**Abb.30:** Spektrale Signatur der Klasse VIII

Diese Klasse umfasst die weit verbreiteten Schwemm- und Altholzsaume am Rande der jährlichen und episodischen Überflutungsbereiche. Die Oberfläche ist geprägt durch teils mehrere Meter breite Säume aus angeschwemmtem Totholz. Das Holz ist größtenteils frei von Borke und stark ausgebleicht (Abb.32).

Die Klasse wird von der Profilmessung T052 auf Ebe-Basyn-Sise charakterisiert. Die maximale Reflexion liegt bei 26%. Der Kurvenverlauf ist durchgängig sehr flach. Der *red edge* ist nicht bis kaum vorhanden. Zudem lassen die deutliche Celluloseabsorption zwischen 2030 – 2150nm und 2250 – 2400nm und die fehlende Chlorophyllabsorption die tote Vegetation erkennen. Fehlende Wasserabsorptionen deuten auf die Trockenheit der ansonsten sandigen Oberfläche.

**Klasse IX, Oberfläche der 1. Terrasse (Abb.31):**

**Abb.31:** Spektrale Signaturen der Klasse IX

Die Klasse repräsentiert die höheren, nicht mehr überfluteten Terrassenniveaus der 1. Terrasse (Abb.33). Die Oberfläche ist stellenweise durch hexagonale *low-centre* Polygone geprägt. Die Polygonstruktur variiert jedoch in der Ausprägung ihrer Deutlichkeit. Der Untergrund ist meist sandig und feucht. Stellenweise befinden sich Tümpel in den Polygonzentren. Anderenorts sind die Zentren mäßig trocken bis feucht. Die Wälle der Polygone sind bis zu 50cm erhöht. Die Durchmesser der Polygone betragen im Mittel 8 – 10m. Die Vegetation wird dominiert von Gräsern, Zwergsträucher und Kräutern auf teils dichten Moospolstern. An trockeneren Standorten treten *Salix sp.* in den Vordergrund. In sehr feuchten und nassen Polygonzentren dominieren Seggen. Die sommerliche Auftauzone schwankt abhängig von Drainagesituation und Vegetationsbedeckung zwischen 30 und 60cm.

In diese Klasse fließen die Profilmessungen Sam2 und Sam3 auf der Insel Samoylov ein. Die Spektren zeigen maximale Reflexionen von 33% (Sam3a), 27% (Sam2) und 23% (Sam3b). Die Kurvenverläufe im VIS der Spektren sind horizontal bis leicht abfallend mit deutlichen Grünreflexionen (555nm). Die Chlorophyllabsorption (680nm) ist bei allen drei Spektren deutlich ausgeprägt. Der steile Anstieg der Kurven im Übergang vom VIS in das NIR ist deutlich, flacht jedoch bei 740nm leicht ab. Den steilsten und höchsten Anstieg zeigt das Spektrum Sam3a. Zwischen 920 – 1300nm zeigen die Spektren einen abfallenden Verlauf in Richtung der langen Wellenlängen. Die Wasserabsorptionsbereiche aller Spektren sind deutlich. Vor allem der Bereich zwischen 1120 – 1240nm ist breit und tief. Im Bereich zwischen 2000 – 2400nm ist ein konvexer, jedoch relativ flacher Kurvenverlauf zu erkennen. Insgesamt lassen die Kurven auf eine feuchte Oberfläche schließen, wie die Wasserabsorptionen und die niedrigen



Gesamtreflexionen zeigen. Die tiefen Chlorophyllabsorptionen, die Grünreflexion, der *red edge* der Kurven und der Verlauf zwischen 2000 – 2400 nm deuten auf die eher hohe Vitalität der Vegetationsbedeckung. Die Unterschiede in den Reflexionen der Kurven ergeben sich vermutlich aus den abweichenden Feuchtigkeits- und Vitalitätsverhältnissen der Oberflächen.

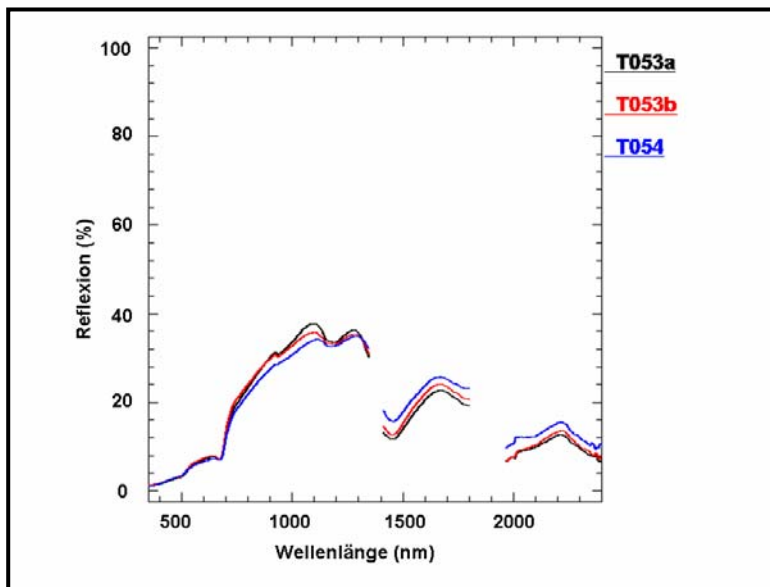


**Abb.32:** Schwemmholzsäume begrenzen den Auenbereich der 1.Terrasse (Klasse VIII)



**Abb.33:** Oberstes Akkumulationsniveau, Oberfläche der 1.Terrasse (Klasse IX), *Links/Rechts:* Standort Sam2

### Klasse X, höhere Überflutungsniveaus der 1. Terrasse (Abb.34)



**Abb.34:** Spektrale Signaturen der Klasse X

Die spektrale Signatur höherer Überflutungsbereiche der 1. Terrasse wird durch diese Klasse dargestellt. Sie umfasst Auenbereiche, die nur episodisch zu Hochwasserereignissen überflutet werden. Diese Oberflächen sind gekennzeichnet durch relativ trockene bis feuchte Bedingungen mit teilweise stehendem Wasser. Polygonstrukturen sind nicht vorhanden. Das Relief ist flach und eben. Die Bereiche befinden sich etwa 3 - 4m über dem Kanalwasserspiegel. Die saisonale Auftautiefe beträgt im Durchschnitt 35 – 40cm. Die Vegetation weist eine durchschnittliche Wuchshöhe von 30 – 40cm auf. Sie besteht aus Gräsern, Seggen und *Salix sp.* auf Moosen und wird an feuchten Standorten teils von in Büscheln gruppierten Pflanzen (Tussocks) dominiert. Stellenweise finden sich Flächen stehenden Wassers und freiliegenden Bodens. Zum Zeitpunkt der Messung (Ende August) war die Vegetation bereits deutlich herbstlich eingefärbt und stellenweise bereits vertrocknet (Abb.35).

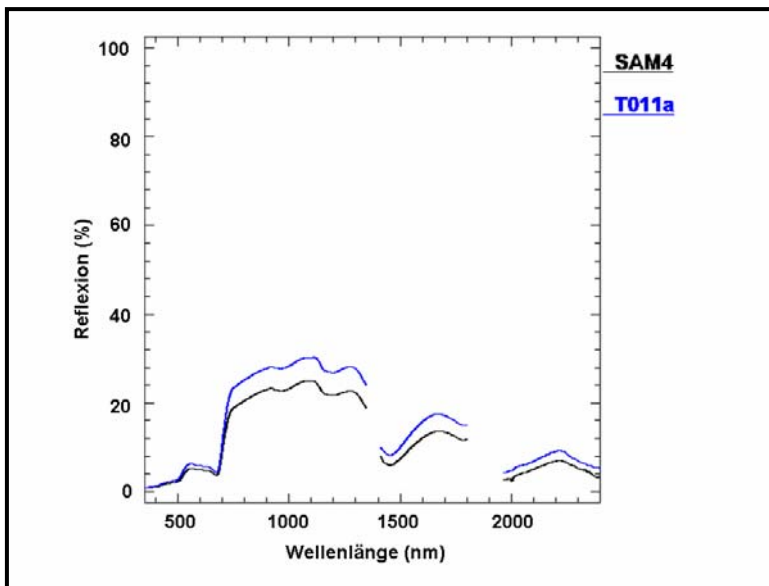
Die Klasse besteht aus den Profilmessungen T053 auf Ebe-Basyn-Sise und T054 auf Turakh-Sise. Die maximalen Reflexionen der Kurven liegen bei 34 - 37%. Alle drei Spektren zeigen einen deutlichen Anstieg im VIS, mit einem Maximum im Bereich der Rotreflexion (640nm). Die Chlorophyllabsorptionen sind flach bei T053a/b und bei T054 kaum vorhanden. Der *red edge* (etwa 700nm) zeigt einen Knick und eine Abflachung bei bereits 730nm. Insgesamt zeigen die Kurven bis 1300nm einen ansteigenden Verlauf. Der Wasserabsorptionsbereich von 920 – 1030 ist kaum zu erkennen. Der Absorptionsbereich zwischen 1120 – 1240nm ist bei T054 flach und bei T053a/b deutlicher. Im Bereich zwischen 2000 – 2400nm zeigen die Spektren T053a/b nur sehr leichte konkave Formen. Bei dem Spektrum T054 ist eine Celluloseabsorption deutlich anhand der konkaven Formen zwischen 2030 – 2150nm und 2250 – 2400nm zu erkennen. Allgemein deuten

alle Spektren auf mehr oder weniger trockene Vegetation. Allerdings sind die Oberflächenbedingungen der Standorte T053a/b etwas günstiger, wie in den deutlicheren Wasserabsorptionsbereichen zu erkennen ist. Der Verlauf der Spektren im sichtbaren Bereich des Lichtes sowie zwischen 2000 – 2400nm und die höheren Gesamtreflexionen deuten auf die ausgehende Vegetationsperiode und damit den Verlust der Vitalität des Pflanzenbestandes.



**Abb.35:** Höhere Überflutungsniveaus der 1.Terrasse (Klasse X), *Oben:* Standort T053a, *Unten:* Standort T053b



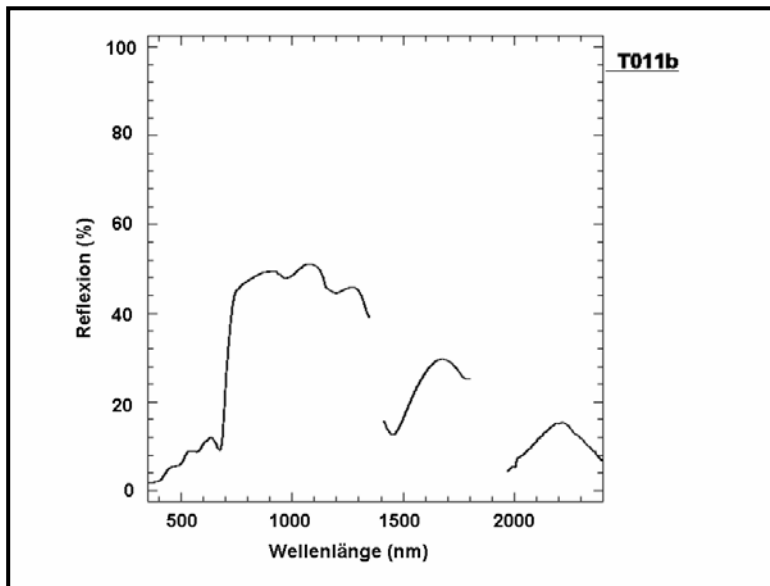
**Klasse XI, Auen der 1. Terrasse (Abb.36):**

**Abb.36:** Spektrale Signaturen der Klasse XI

Die Klasse repräsentiert die Auen und niederen, in der Regel jährlichen Überflutungsbereiche der 1. Terrasse. Die Oberflächen dieser Klasse sind feucht und mäßig drainiert. Häufig ist stehendes Wasser zu finden. Die Bereiche befinden sich etwa 1 - 2m über dem Flusswasserspiegel. Das Relief ist teilweise leicht zum Fluss hin geneigt. Die mittlere sommerliche Auftautiefe des sandigen Untergrundes liegt bei 50 – 60cm. Die Vegetationsbedeckung ist häufig gering (60 – 80%). Verbreitet sind kleine vegetationsfreie Sedimentflächen. Die Vegetation setzt sich überwiegend aus Seggen, Moosen und *Salix sp.* sowie aus Flecken gruppierter Wollgräser zusammen (Abb.38). Die Wuchshöhen erreichen 30cm.

Die Klasse besteht aus den Profilmessungen Sam4 auf der Insel Samoylov und T011a auf Ebe-Basyn-Sise. Die Maxima der Reflexionen liegen bei 30% (T011a) und 25% (Sam4). Im VIS der Spektren ist die deutliche Grünreflexion bei 555nm zu erkennen und ein Abfall der Kurven in Richtung der tiefen Chlorophyllabsorption bis 680nm. Der *red edge* zwischen 690 – 740nm ist steil ausgeprägt. Der Anstieg der Kurven weist einen scharfen Knick und eine deutliche Abflachung bei 740nm auf. Die Wasserabsorptionen sind erkennbar, aber nicht sehr deutlich. Zwischen 2000 – 2400nm zeigen die Kurvenverläufe flache Glockenkurven. Insgesamt deuten die Verläufe der Spektren im VIS sowie am Übergang vom VIS zum NIR und im Bereich zwischen 2000 – 2400nm auf eine sehr vitale Vegetation. Die vergleichsweise geringen Wasserabsorptionsbereiche werden vermutlich durch einen relativ geringen Wassergehalt der Blätter beeinflusst.

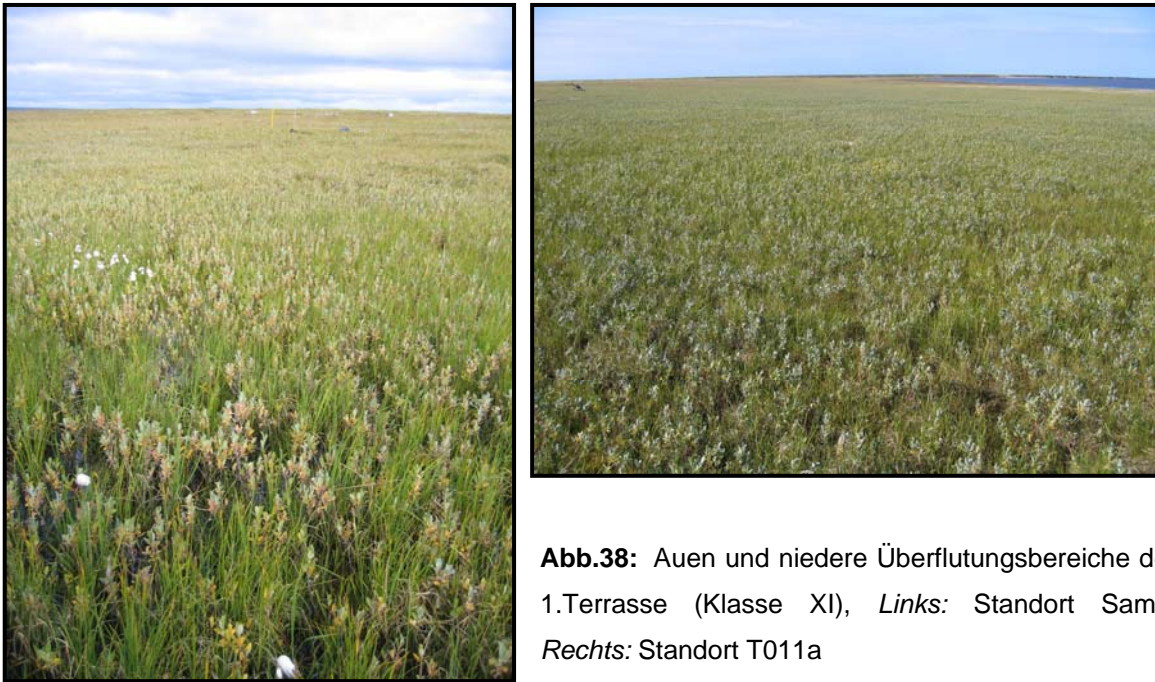
### Klasse XII, Auen der 1. Terrasse dominiert durch *Arctophylla sp.* (Abb.37):



**Abb.37:** Spektrale Signatur der Klasse XII

Die Klasse charakterisiert Auenbereiche die deutlich von *Arctophylla sp.* (*Poaceae*) dominiert werden. Hierbei handelt es sich stellenweise um mehrere Hundertmeter große Flächen innerhalb der Auen. Die Oberflächenbedingungen sind vergleichbar mit denen der Klasse XI. Jedoch sind die Oberflächenbedingungen und der Untergrund sehr feucht bis nass mit teilweise stehendem Wasser bis 5cm Wassertiefe. Die sommerliche Auftauzone erreicht 70 – 80cm. Der Bedeckungsgrad der Vegetation liegt bei 80 – 90%. Zum Messzeitpunkt wurde die bis zu 60cm hohe Vegetation stark vom Wind umgelegt. Vereinzelt treten Wollgräser auf (Abb.39).

Charakteristisch für diese Klasse ist die Punktmessung T011b auf Ebe-Basyn-Sise. Das Maximum der Reflexion liegt bei 51%. Typisch sind der sehr steile Anstieg und die hohen lokalen Reflexionen im VIS, besonders im Bereich des grünen (550nm) und vor allem roten Lichtes (640nm). Zu erkennen ist weiterhin die tiefe Chlorophyllabsorption (680nm) und der sehr steile, hohe *red edge* der Kurve zwischen 690 – 750nm. Zwischen 900 – 1300nm zeigt die Kurve einen abfallenden Verlauf in Richtung der längeren Wellenlängen. Die Wasserabsorptionen sind deutlich. Besonders zwischen 1120 und 1240nm zeigt das Spektrum einen tiefen Absorptionsbereich. Im Bereich von 2000 – 2400nm ist eine steile, spitze Glockenkurve zu erkennen. Diese spektrale Signatur kann als typisch für *Arctophylla sp.* Populationen angesehen werden. Die hohe Reflexion, der sehr steile hohe *red edge*, die tiefe Chlorophyllabsorption und der Verlauf der Kurve zwischen 2000 – 2400nm deuten auf eine hohe Vitalität der Vegetation. Aus den Wasserabsorptionen lässt sich die Feuchtigkeit der Oberfläche erkennen. Der Verlauf der Kurve im sichtbaren Bereich des Lichtes weist vermutlich auf die rötliche Färbung der Gräser.



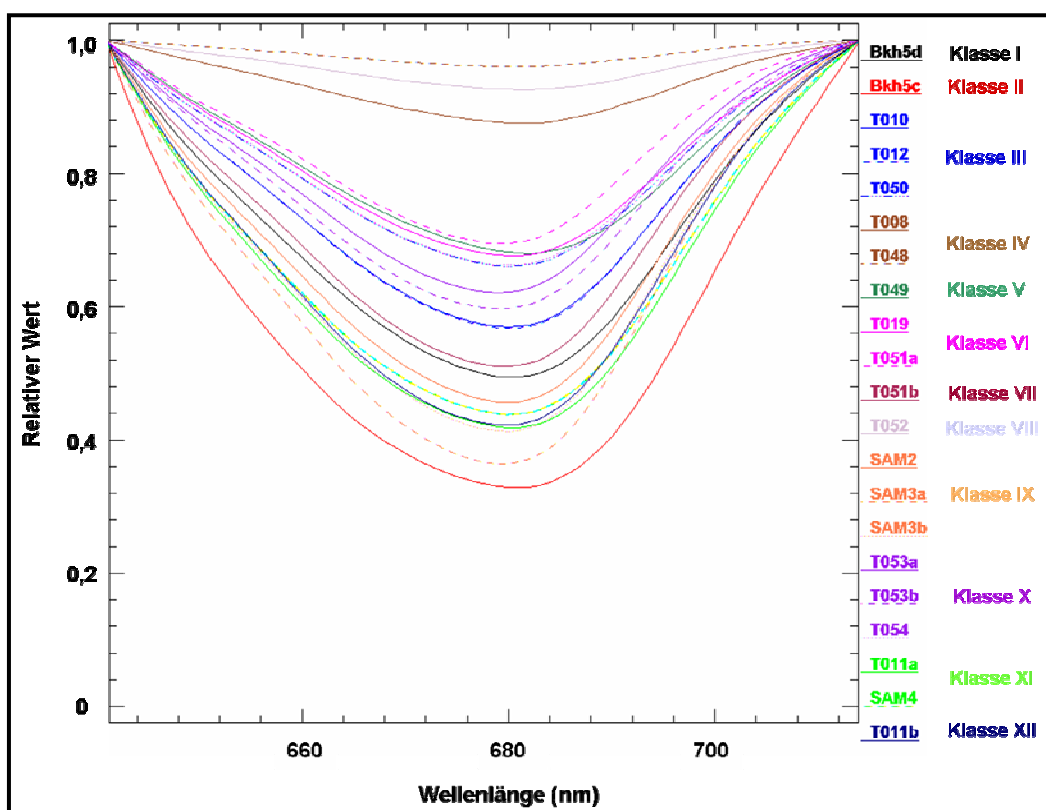
**Abb.38:** Auen und niedere Überflutungsbereiche der 1.Terrasse (Klasse XI), *Links:* Standort Sam4, *Rechts:* Standort T011a



**Abb.39:** Auen der 1.Terrasse, Vegetationsbedeckung wird dominiert von *Arctophylla* sp. (Klasse XII)

### 5.1.1. Bewertung signifikanter Absorptionsbereiche der Feldspektren nach Anwendung eines *continuum removal*

Zur genaueren Differenzierung der Profilmessungen wurden der Chlorophyllabsorptionsbereich bei 680nm (Abb.40) und der Bereich der Wasserabsorption zwischen 1120 – 1240nm (Abb.41) einem *continuum removal* unterzogen (s. Kap.4.4.2.). Die Ergebnisse verdeutlichen die Unterschiede der verschiedenen Klassen in den betrachteten Absorptionsbereichen und ermöglichen eine gute Differenzierung der Klassen. Die spektralen Absorptionseigenschaften der einzelnen Klassen können für bestimmte Oberflächenbedingungen und Vegetationsverhältnisse als signifikant betrachtet werden (CURRAN et al. 1990, ELVIDGE 1990, HARRIS et al. 2005).



**Abb.40:** Vergleich der Chlorophyllabsorptionen aller Klassen nach Anwendung eines *continuum removal*

Abbildung 40 zeigt den Bereich der Chlorophyllabsorption für alle Klassen. Sehr Tiefe Absorptionen sind bei den Klassen II, IX, XII, XI zu erkennen. Es handelt sich dabei um Auen und Überflutungsbereiche, die Oberfläche der 1.Terrasse sowie die Alassenken der 3.Terrasse. Diese Klassen repräsentieren erosiv gestörte und wiederbesiedelte Flächen, wie im Falle der Klasse II und/oder von ständig sedimentären und hydrologischen Veränderungen geprägte Verhältnisse und damit Flächen, die von schnell wachsender und dichter Gräser- und Seggenvegetation dominiert werden. Die Klasse IX weist ein heterogenes Bild in den Absorptionstiefen innerhalb der Klasse auf.

Tiefe Absorptionen zeigen auch die Klassen I und VII. Hierbei handelt es sich um die Oberfläche der 3. Terrasse und um vermoorte und verlandete Flachwasserbereiche der 2. Terrasse.

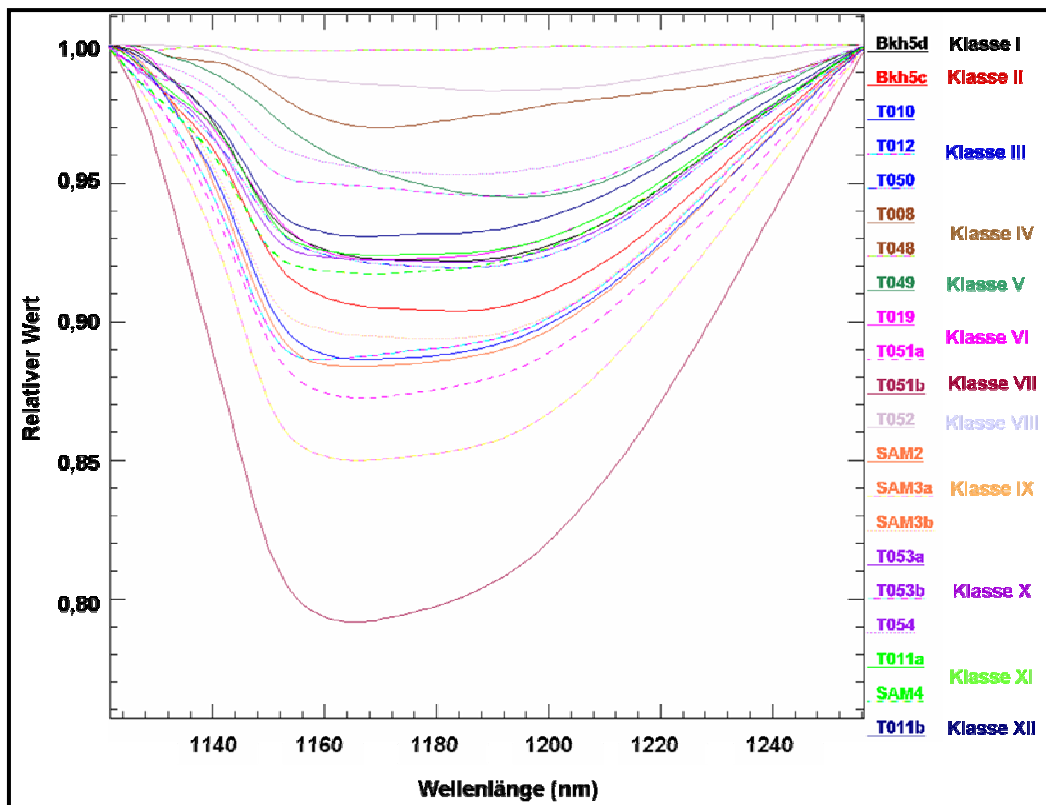
Die Klasse III, X, VI und V zeigen mittlere Tiefen in der Chlorophyllabsorption. Diese Klassen repräsentieren die polygonale Tundra und die verschiedenen Bereiche der Alase der 2. Terrasse sowie die episodischen Überflutungsbereiche der 1. Terrasse. Die Chlorophyllabsorption dieser Klassen deutet auf eine geringere Vitalität der Vegetation an den einzelnen Standorten. Die zu den Aufnahmezeitpunkten bereits häufig herbstlich eingefärbte Vegetation sowie die an den meisten Standorten teilweise vorhandene Staunässe (Klasse III, X, VI) oder Trockenheit der Oberfläche (Klasse V) und damit verbundene Vegetationstypen können Gründe für die geringer ausgeprägten Chlorophyllabsorptionsbereiche sein. Klasse III und X zeigen größere Abweichungen in den Absorptionen innerhalb der Klassen.

Keine bis sehr geringe Chlorophyllabsorption ist in den spektralen Signaturen der Klassen IV und VIII zu erkennen. Diese charakterisieren die Sandflächen der 2. Terrasse und die auf der 1. Terrasse verbreiteten Schwemmhölzsäume. Beide Klassen sind geprägt durch fehlende, trockene oder tote Vegetation. Somit ist eine tiefere Chlorophyllabsorption nicht zu erwarten.

Abbildung 41 zeigt für alle Klassen den mit einem *continuum removal* verstärkten Wasserabsorptionsbereich zwischen 1120 – 1240nm. Die Ausprägung dieses Absorptionsbereiches kann als relatives Maß für den Wassergehalt in der Vegetation aber auch für die Feuchtigkeit der Oberfläche betrachtet werden.

Die stärkste Wasserabsorption weist die Klasse VII auf, die die sehr feuchten Oberflächenverhältnisse der vermoorten Flachwasserbereiche und den hohen Wassergehalt der Vegetation (z.B. *Sphagnum sp.*) repräsentiert. Ebenfalls relativ tiefe Absorptionen, allerdings mit Abweichungen innerhalb der Klasse, sind in Klasse IX zu erkennen. Sie charakterisieren die teils feuchte bis nasse Oberfläche der 1. Terrasse, die auch von zahlreichen Polygontümpeln geprägt ist. Ebenfalls auffällige Absorptionstiefen zeigen die Klassen VI, III und II. Die Klassen VI und III repräsentieren die stellenweise sehr feuchten Oberflächen der polygonalen Tundra und Alassenken der 2. Terrasse. Beide Klassen zeigen allerdings große Abweichungen in den Absorptionen innerhalb der Klassen. Klasse II repräsentiert die Alassenken der 3. Terrasse und somit eine sehr vitale Vegetation mit einem vermutlich hohen Wassergehalt.





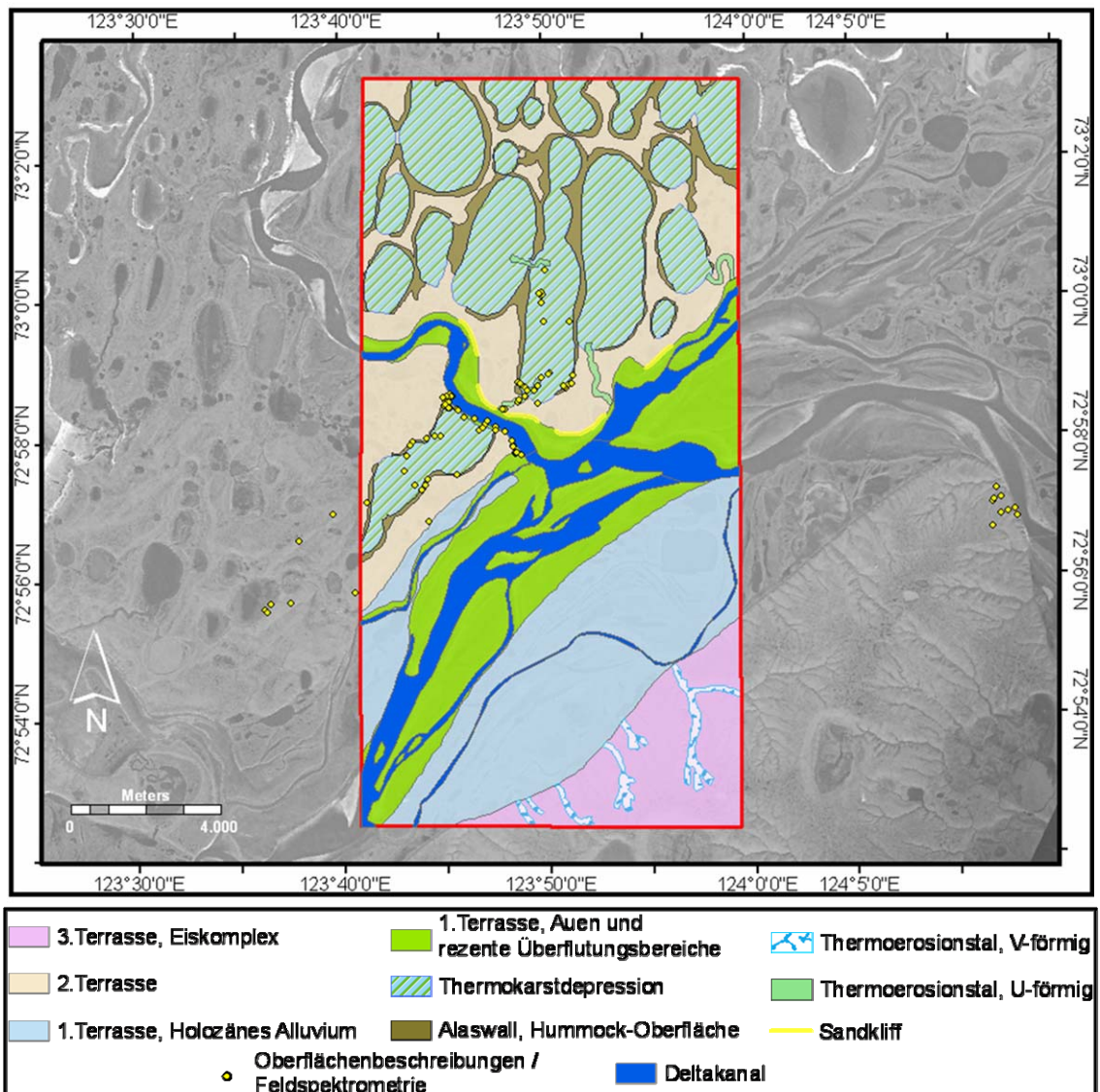
**Abb.41:** Vergleich der Wasserabsorptionen aller Klassen nach Anwendung eines *continuum removal*

Mittlere bis flache Absorptionstiefen zeigen die Klassen X, XI, XII und I. Die Klasse XI und XII stellen die jährlichen Überflutungsbereiche der 1.Terrasse dar. Die Oberflächenverhältnisse variieren hier stark, d.h. stellenweise existiert gut drainierter Untergrund und anderenorts bilden sich Staunässe und Oberflächenwasser. Trotz des teils feuchten Untergrundes werden die spektralen Signaturen dieser Klassen stark von der Reflexion der eher trockenen Vegetation dominiert. Die relativ schwachen Wasserabsorptionen der Klasse X und die großen Schwankungen innerhalb dieser Klasse sind auf die bereits herbstlich trockene Vegetation zurückzuführen. Die durch die Klasse I repräsentierten Oberflächenverhältnisse der 3.Terrasse können ebenfalls als eher trocken bezeichnet werden. Stehendes Wasser ist auf dieser Oberfläche selten vorhanden.

Sehr flache bis flache Wasserabsorptionen zeigen die Klassen IV, VIII und V. Die Trockenheit der Sandflächen der 2.Terrasse und der Schwemmhölzsäume der 1.Terrasse sowie deren geringe Vegetationsbedeckung werden hier deutlich. Die Wasserabsorption der Klasse V ist auf Grund der trockenen Verhältnisse des sandigen Untergrundes auf den Alaswällen der 2.Terrasse schwach wird zusätzlich stark durch die geschlossene sehr trockene Vegetationsbedeckung (Flechten) beeinflusst.

## 5.1. Ergebnis der geomorphologischen Kartierung

Mit Hilfe des DGM (s. Abb.11) und der intensiven geomorphologischen Felderkundung (Anhang 2) wurde eine einfache geomorphologische Basiskarte des Hauptuntersuchungsgebietes erstellt. Diese beinhaltet 9 geomorphologische Einheiten (Abb.42). Die mit ArcGIS™ errechnete Gesamtfläche des kartierten Gebietes beträgt 201,7km<sup>2</sup> (Tab.2).



**Abb.42:** Geomorphologische Karte des Hauptuntersuchungsgebietes, kartiert mit Hilfe des DGM und eigenen Felderkundungen. Im Hintergrund ein panchromatisches Corona-Satellitenbild

**Tab.2:** Gesamtfläche des Hauptuntersuchungsgebietes und Flächenanteile der kartierten geomorphologischen Einheiten

Fläche gesamt	3.Terrasse	2.Terrasse	1.Terrasse, Holozänes Alluvium	1.Terrasse, Auen	Thermokarstdepressionen	Alaswälle
201,7km <sup>2</sup>	18,6km <sup>2</sup>	91,8km <sup>2</sup>	43,5km <sup>2</sup>	47,9km <sup>2</sup>	48,6km <sup>2</sup>	11,3km <sup>2</sup>

Innerhalb des kartierten Areals beträgt der Anteil der 3. Terrasse 18,6km<sup>2</sup>. Die 2. Terrasse nimmt 91,8km<sup>2</sup> des Gebietes ein. Die 1. Terrasse wurde noch einmal in den Bereich des holozänen Alluviums (43,5km<sup>2</sup>) und den Bereich der Auen und rezenten Überflutungsflächen (47,9km<sup>2</sup>) untergliedert. Das Hauptuntersuchungsgebiet wird also dominiert durch die Oberflächen der 1. und 2. Terrasse (Tab.2). Etwa 24% (48,6km<sup>2</sup>) der Gesamtfläche werden von Thermokarstsenken eingenommen, wobei diese mit 53% über die Hälfte der 2. Terrasse einnehmen. Zudem wurden Alaswälle bzw. -hänge der Thermokarstsenken kartiert und ihr Gesamtflächenanteil mit 11,3km<sup>2</sup> bestimmt. Ihr Anteil an der 2. Terrasse beträgt etwa 12%. Des Weiteren wurden 2 verschiedene Formen von Thermoerosionstälern kartiert. V-förmige Täler drainieren vor allem die 3. Terrasse. Auf der 2. Terrasse dominieren U-förmige Täler. Am Ufer entlang der Hauptkanäle befinden sich stellenweise steile Sandkliffs, die ebenfalls kartiert wurden.

## **5.2. Ergebnis der Landsat-7 basierten Maximum-Likelihood Klassifikation**

### **5.2.1. Klassifikationsergebnis**

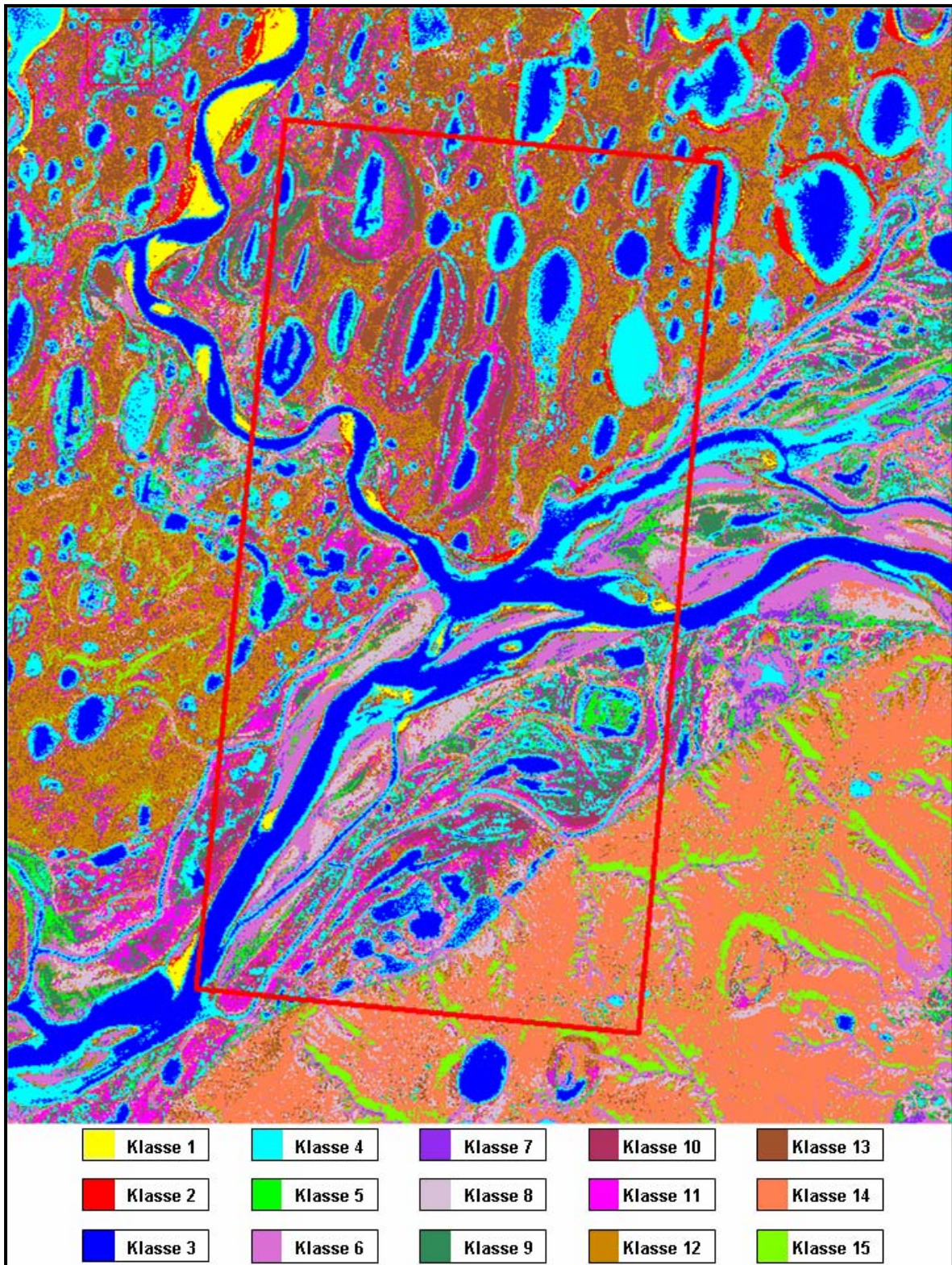
Das Ergebnis der Klassifikation des Landsat-7 Bildausschnittes (vgl. Kap.4.3.2.) ist in einer Karte des Hauptuntersuchungsgebietes mit 15 Oberflächenklassen dargestellt (Abb.43). Die Klassen basieren auf den spektralen Charakteristiken verschiedener geomorphologischer Strukturen und Oberflächentypen in den Landsat-7 ETM+ Daten. Nach der Durchführung einer unüberwachten Klassifikation wurden die Trainingsgebiete zur Durchführung der Maximum-Likelihood Klassifikation festgelegt. Zur Ausweisung der Trainingsgebiete wurden neben der visuellen Auswertung verschiedener Satellitenbilder die Erkenntnisse aus den geomorphologischen Felderkundungen herangezogen.

In Tabelle 2 sind die einzelnen Klassen und deren allgemeine Oberflächencharakteristiken sowie die für die Klasseninterpretation verwendeten Standorte aus der geomorphologischen Geländeerkundung angegeben. Die detaillierten Standortbeschreibungen sind im Anhang 2 zusammengefasst.

**Tab.3:** Auflistung der Klassen nach einer Maximum-Likelihood Klassifikation eines Landsat-7 Bildausschnittes, der Oberflächencharakteristiken sowie der dazugehörigen Standortbezeichnungen der geomorphologischen Felderkundungen

Klasse, Oberflächencharakteristik	Standort
Klasse 1, Sandflächen, vegetationsfrei	Tur1, T021, T023, T048
Klasse 2, Sandflächen, bewachsen	T008, T021, T023, T026, T048
Klasse 3, Wasserflächen	
Klasse 4, Flachwasserbereiche, kaum bis wenig bewachsen	T016, Tur-Lake-5, T021, T030, T041
Klasse 5, Flachwasserbereiche, bewachsen, moorig	T007, T022b, T029, T037, T054
Klasse 6, Auenbereiche sowie Bachtäler der 3.Terrasse	Sam4, Bkh05c, T001, T002, T011a, T042, T043, T046
Klasse 7, Auenbereiche dominiert von feuchtigkeitsliebenden Gräsern ( <i>Arctophylla sp.</i> )	T011b
Klasse 8, höher gelegene Überflutungsbereiche, <i>Salix sp.</i> , Seggen und Moose	Sam3, Sam4, T009, T053, T054
Klasse 9, sehr feuchte Bereiche in Senken und Überflutungsbereiche mit stehendem Wasser, Moose und Seggen	T016, T019, Tur-Lake-9-4, T028, T036, T053
Klasse 10, sehr feuchte Bereiche und/oder Thermokarstdepressionen mit polygonaler Struktur und stehendem Wasser, Seggen, Moose, weniger <i>Salix sp.</i>	Sam1, Sam2, T003, T010, T017, T030, T032, T050
Klasse 11, Thermokarstdepressionen und/oder feuchte Bereiche mit undeutlicher Polygonstruktur und weniger stehendem Wasser, <i>Salix sp.</i> , Seggen, Moose	T004, T006, T012, T022b, T025, T031, T035, T051
Klasse 12, relativ trockene Tundraoberflächen, Gräser und Zwergsträucher	T014, T015, Tur1, T032, T038, T039, T041
Klasse 13, sehr trockene Hummock-Oberflächen, Alaswälle	T005, T013, T018, Tur-Lake-9-1, Tur-Lake-9-2, T027, T038, T039, T049
Klasse 14, Oberfläche der 3.Terrasse, Eiskomplex	Bkh05c, Bkh05d, T044, T047
Klasse 15, gut drainierte trockene Hangbereiche der 3.Terrasse	Bkh05c, T042, T043, T046

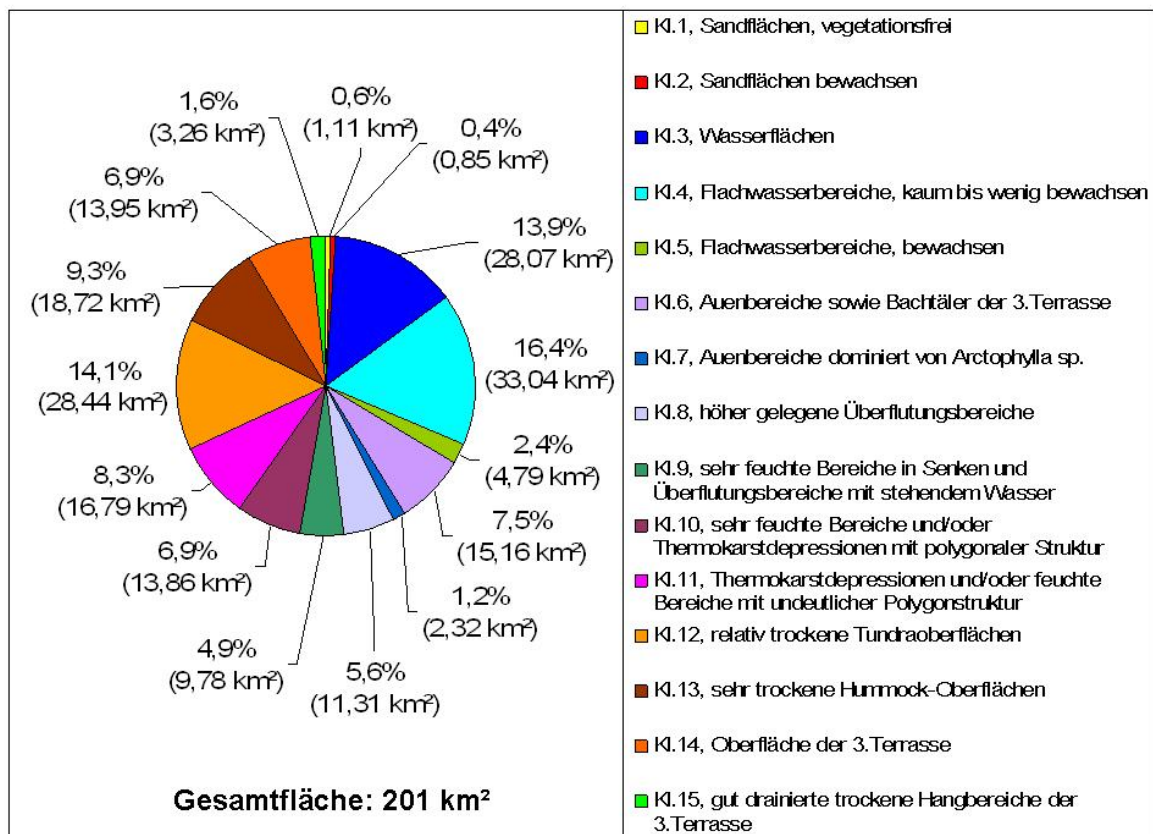




**Abb.43:** Ergebnis der überwachten Maximum-Likelihood Klassifikation für das Hauptuntersuchungsgebiet auf der Basis eines Landsat-7 ETM+ Bildausschnittes (Aufnahmedatum: 26.07.2001, Auflösung: 30 x 30m). Die Rote Box markiert das Hauptuntersuchungsgebiet (vgl. Abb.8)



Ein wichtiges Ergebnis der Satellitenbildklassifikation ist die Bilanzierung der Flächen der einzelnen Klassen innerhalb des Hauptuntersuchungsgebietes. Die in ENVI™ errechnete Fläche des gesamten Hauptuntersuchungsgebietes beträgt 201,4 km<sup>2</sup> (Abb.44). Die Klasse 4 nimmt mit einem Flächenanteil von 16,4% den größten Anteil im Hauptuntersuchungsgebiet ein. Die Klasse 12 bedeckt 14,1% des Gebietes. Weitere stark vertretene Klassen sind Klasse 3 (13,9%) und Klasse 13 (9,3%). Flächen mit Anteilen zwischen 9% und 5% am Hauptuntersuchungsgebiet werden von den Klassen 11, 6, 10, 14 und 8 eingenommen. Insgesamt wird aus der Verteilung der Klassen deutlich, dass das Hauptuntersuchungsgebiet von nassen bis feuchten Oberflächen dominiert wird. Trockeneren Oberflächen charakterisiert durch die Klassen 12 – 15, 1 und 2, bedecken etwa 1/3 der Gesamtfläche.



**Abb.44:** Prozentualer Anteil der Landsat-7 basierten Klassen an der Gesamtfläche des Hauptuntersuchungsgebietes. Der Wert in Klammern gibt die Flächengröße an.

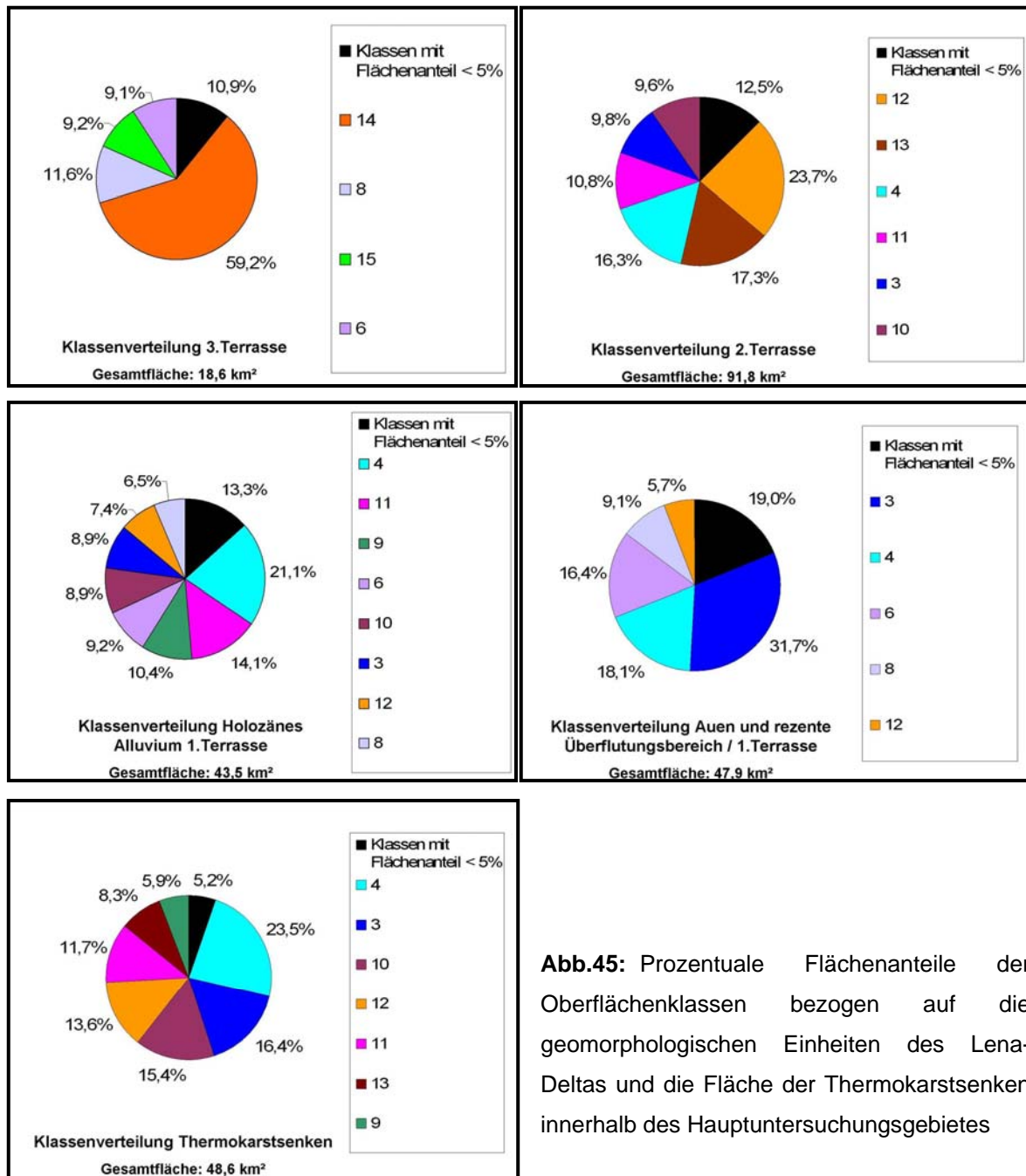
### 5.2.2. Verbreitung der Klassen auf den geomorphologischen Haupteinheiten

Im Folgenden wird die Klassenverteilung bezogen auf die im GIS kartierten geomorphologischen Deltaterrassen und die Thermokarstsenken des Untersuchungsgebietes dargestellt (Abb.45). Die Verteilung der Klassen zeigt deutliche Unterschiede zwischen den drei Hauptterrassen und gibt einen Überblick über die

grundsätzlichen Oberflächencharakteristiken der einzelnen geomorphologischen Deltaeinheiten innerhalb des Hauptuntersuchungsgebietes.

Während die gesamte 1. Terrasse des Lena-Deltas im Untersuchungsgebiet von feuchten und nassen Oberflächentypen dominiert wird, wie in Abbildung 45 zu sehen ist, werden bei der 2. und 3. Terrasse große Areale auch durch eher trockene Oberflächen eingenommen (Klasse 12 – 15). Im Diagramm der 2. Terrasse ist der größte Anteil der Klasse 12 sowie der Klasse 13, im Vergleich zur Klassenverteilung der anderen geomorphologischen Deltaterrassen zu erkennen. Des Weiteren wird deutlich, dass Oberflächentypen mit charakteristischer Tundrapolygon-Landschaft innerhalb feuchter Senken (Klasse 10 und 11) vor allem in den Bereichen der 2. Terrasse und des holozänen Alluviums der 1. Terrasse vorkommen. Die Klassenverteilung der Auen und rezenten Überflutungsbereiche der 1. geomorphologischen Deltaterrasse zeigt den größten Anteil der Klasse 4, der Klasse 6 sowie den größten Flächenanteil der Klasse 3. Die Auen und rezenten Überflutungsbereiche des Untersuchungsgebietes sind somit von nassen Oberflächentypen und Wasserflächen geprägt. Die 3. Terrasse wird zu 59,2% durch die Klasse 14 dominiert. Diese Klasse stellt den charakteristischen Oberflächentyp der 3. geomorphologischen Hauptterrasse des Lena-Deltas dar. Zudem ist auch die Klasse 15 nur in der Klassenverteilung der 3. Terrasse vorhanden. Im Vergleich der Deltaterrassen zeigt das Diagramm des holozänen Alluviums der 1. Terrasse die meisten Oberflächenklassen mit Flächenanteilen von mehr als 5%.

Die Verteilung der Klassen bezogen auf die Thermokarstsenken zeigt, dass große Bereiche der Senken von Wasserflächen und Flachwasserbereichen sowie sehr feuchten Arealen eingenommen werden. Große Teile innerhalb der Senken sind zudem durch die Verbreitung von polygonalen Strukturen geprägt. Die Klassen 12 und 13, die trockene Oberflächen repräsentieren, haben ebenfalls einen bedeutenden Anteil an der Fläche der Thermokarstsenken. Sie dominieren in der Regel die Hangbereiche der Senken.



**Abb.45:** Prozentuale Flächenanteile der Oberflächenklassen bezogen auf die geomorphologischen Einheiten des Lena-Deltas und die Fläche der Thermokarstsenken innerhalb des Hauptuntersuchungsgebietes

### 5.2.3. Fehlerbetrachtung und Bewertung der Klassifikation

Die Ergebnisse der Landsat-7 Klassifikation basieren auf der Pixelgröße der Landsat-7 ETM+ Daten von 30 x 30m. So sind zum einen Aussagen über die Genauigkeit der Klassifikation möglich. Eine detaillierte Quantifizierung der Genauigkeit konnte auf Grund fehlender unabhängiger Referenzdaten nicht durchgeführt werden (s. Kap.4.3.2.). Zum anderen besteht durch die Vergleichbarkeit beider innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Klassifikationen auch die Möglichkeit Aussagen zur Verteilung der feldspektralen Signaturen einzelner geomorphologischer Strukturen und Oberflächentypen zu treffen. Allerdings ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass es sich bei einer

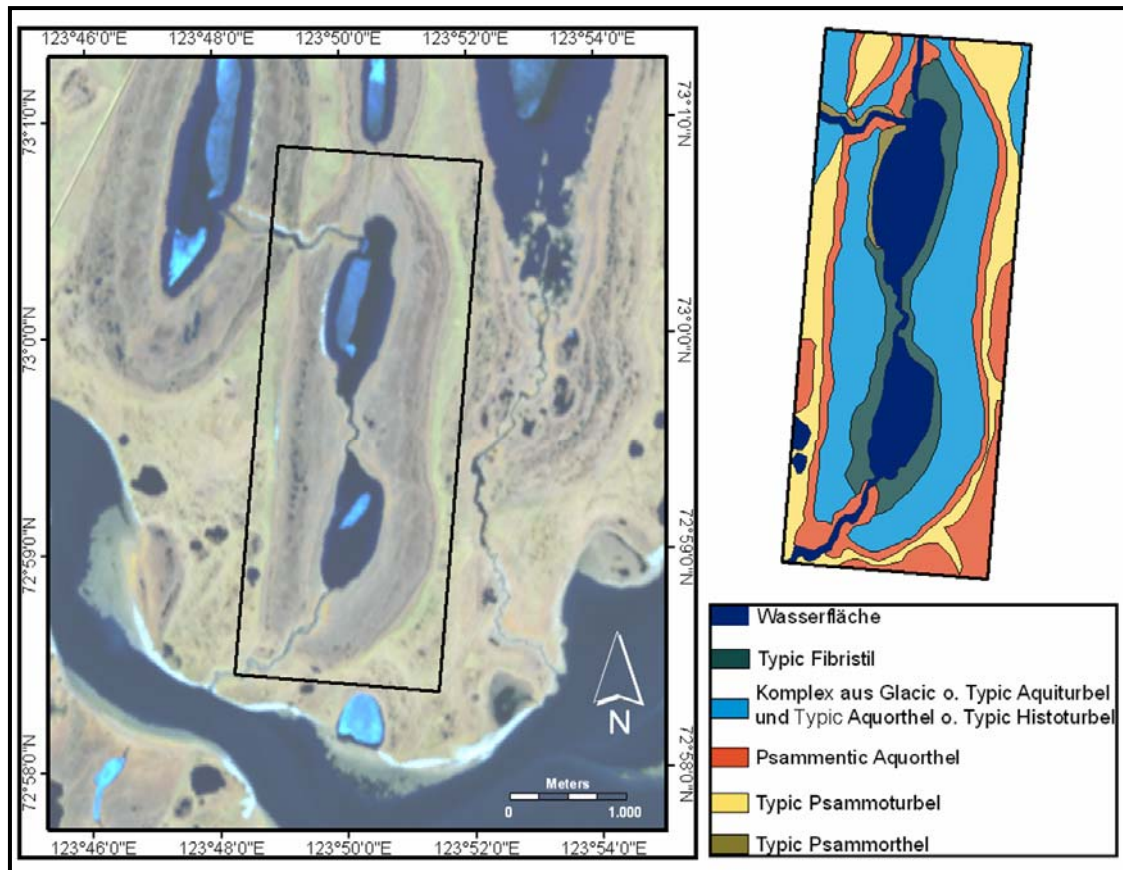


Satellitenbildaufnahme um eine Momentaufnahme des abgebildeten Gebietes handelt. Dies bedeutet, dass Schwankungen des Wasserspiegels oder Wechsel der Vegetationsverhältnisse und Oberflächenbedingungen aber auch der Beleuchtungsverhältnisse nicht berücksichtigt werden können. Demzufolge ist es möglich, dass die Flächen einzelner Klassen über- oder unterbewertet sind. Beispielsweise könnten Sandflächen an Uferbereichen der Deltakanäle oder Auenbereiche bei Hochwasserereignissen als Flachwasserbereiche klassifiziert werden. Während Niedrigwasserereignissen oder durch den äolischen Eintrag von in der Regel hoch reflektierendem Sand auf andere Oberflächen könnte sich andererseits die als Sandflächen klassifizierten Areale auch vergrößern. Eine weitere Fehlerquelle bei der Klassifikation von Satellitenbildern ist das Problem der Mischpixel. Es besteht darin, dass an den Übergangsbereichen verschiedener Oberflächen und Objekte spektrale Mischsignaturen entstehen. Diese können dazu führen, dass die Pixel auf Grund der entstandenen Signatur einer anderen Klasse zugeordnet werden (vgl. ALBERTZ 2001, RICHARDS & JIA 1999). Im Diskussionskapitel dieser Arbeit werden mögliche Fehler der Klassifikation noch einmal detailliert betrachtet.

### **5.3. Ergebnis der pedologischen Felduntersuchungen**

Die Protokolle der acht während der Feldkampagne kartierten Bodenprofile enthalten die im Feld aufgenommenen und kartierten Parameter sowie die Ergebnisse aus der chemischen und physikalischen Analytik der beprobten Bodenhorizonte (Anhang 3). Die Aufnahmen der Standorte Tur-Lake-9-1 bis 9-4 und Tur-Lake-5 erfolgten innerhalb einer Catena in einer Thermokarstsenke auf der Insel Turakh-Sise (s. Abb.8 u. Abb.42). Auf der Basis dieser Bodenkartierungen, Erkenntnissen aus den Felderkundungen und der visuellen Auswertung eines CHRIS/PROBA Satellitenbildes konnte die wahrscheinliche Verbreitung verschiedener Bodentypen kartiert werden. Die Karte enthält fünf pedologische Einheiten, die nach der US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2003) benannt sind (Abb.46). Alle Böden des Alases sind von fein- bis mittelsandigem Ausgangsmaterial und mehr oder weniger starken Kryoturbations- und Redoxmerkmalen geprägt. Die pH-Werte der Böden liegen durchweg im stark sauren Bereich. Die Gehalte an organischen Kohlenstoff nehmen generell vom Oberhang des Alaswall (Tur-Lake-9-1) zum Seeufer hin (Tur-Lake-5) zu, sind aber mit maximal 11% bei Tur-Lake-5 für Torfe relativ niedrig (AG BODEN 1994, SCHACHTSCHABEL et al. 1992). Die Stickstoffgehalte sind durchweg sehr gering. Die C/N-Verhältnisse werden mit der abnehmenden Zersetzung organischer Substanzen innerhalb der Horizonte aber auch der Catena größer. Das höchste C/N-Verhältnis zeigt somit der Typic Fibristil (Tur-Lake-5). Die Böden unterscheiden sich im Allgemeinen in der Drainagesituation und dem Organikgehalt,

welche im Zusammenhang mit der Reliefsituation des Alases stehen. Die sehr trockenen und gut drainierten Bereiche der Alaswälle sind durch Typic Psammoturbels geprägt (siehe Standort Tur-Lake-9-1 und 9-2). Diese initialen Böden werden stark durch Kryoturbation und Solifluktion beeinflusst. Diese periglazialen Prozesse führen auch zu den typischen Hummock-Oberflächen der Alaswälle. Die Horizonte direkt über der Permafrostoberfläche zeigen Reduktionsmerkmale. Die sommerlichen Auftautiefen betragen 65 – 80cm. An steilen sandigen Erosionskanten, stellenweise an den Ufern der Seen, sind Typic Psammorthel verbreitet. Diese äußerst schwach entwickelten Böden zeigen verschiedene sandige Horizonte mit Redoxmerkmalen (siehe auch Anhang 2, T021). Am Fuß der Alaswälle wird die Drainagesituation deutlich schlechter. In diesem Übergangsbereich zur Alassenke sind Psammentic Aquorthel (siehe Standort Tur-Lake-9-3) ausgebildet. Diese Böden sind im oberen Bereich sandig und relativ trocken, zeigen jedoch anmoorige Merkmale sowie im Zusammenhang mit der hohen Wassersättigung über der Permafrosttafel Vergleyung. Eine weitere Verbreitung dieser Böden wird außerdem für Teile der höher gelegenen Tundraoberflächen der Deltainsel auf Grund von ähnlichen pedologischen Bedingungen angenommen. Große Flächen innerhalb der Alassenke sind durch eine undeutliche bis deutliche Polygonstruktur geprägt. Die zum großen Teil sehr feuchten Oberflächen werden dominiert durch Typic Aquorthels (siehe Standort TurLake-9-4) oder Typic Histoturbels (KUTZBACH & KURCHATOVA 2002). Diese hydromorphen Böden innerhalb der schlecht drainierten Senkenbereiche zeigen deutliche Vergleyung. Mit der Akkumulation organischen Materials kommt es zur Vertorfung. Die saisonalen Auftautiefen betragen nur noch etwa 30 cm. Die bessere Drainagesituation leicht erhobener Wälle innerhalb der Alassenke kann zum Vorkommen von Glacic oder Typic Aquiturbels führen. Diese sind charakterisiert durch einen deutlich tieferen Grundwasserspiegel und eine geringere Akkumulation organischen Materials sowie die Ausbildung von Kryoturbations- und Redoxmerkmalen (PFEIFFER et al. 2002). Für die Uferbereiche um die Seen wird die Verbreitung von Typic Fibristils angenommen (siehe Standort Tur-Lake-5). Diese niedermoorigen Böden zeigen eine starke Akkumulation organischen Materials und das Aufwachsen verschiedener Torfhorizonte über den Seesedimenten in Wechsellagen mit mineralischen Lagen, die von periodischen Wasserhochstanden resultieren. Die Torfe sind an den Seeufern in Form kleinerer Erosionsstufen aufgeschlossen.



**Abb.46:** Bodenkarte für eine Thermokarstsenke der Insel Turakh-Sise auf der Basis eines CHRIS/PROBA Satellitenbildes (Aufnahmedatum: Juni 2005, räumliche Auflösung: 17 x 17m, spektrale Auflösung: 18 Kanäle 438 – 1035nm)

## 6. Diskussion

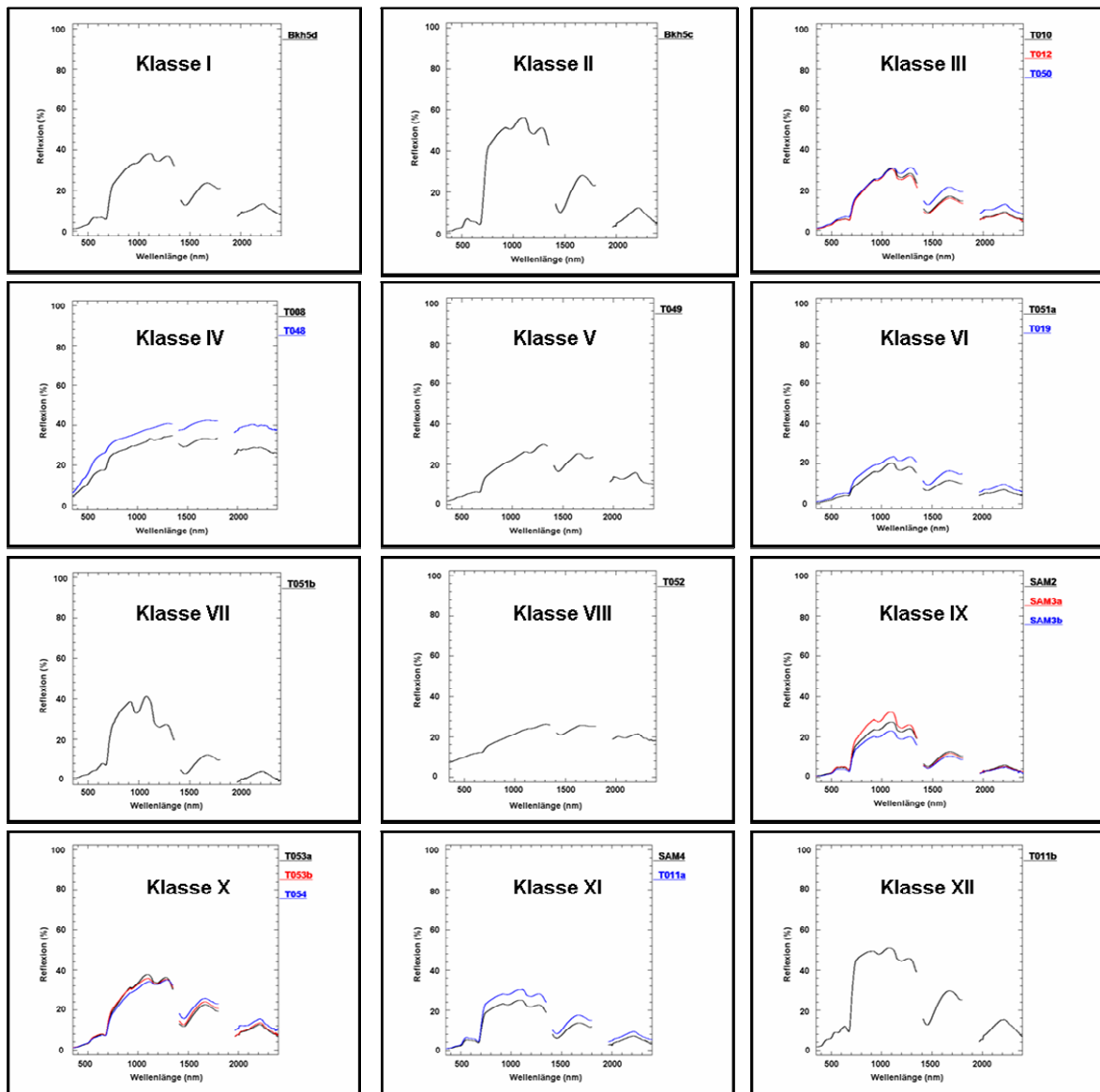
### 6.1. Charakterisierung periglazialer Strukturen und geomorphologischer Oberflächentypen anhand feldspektraler Signaturen

Die einzelnen Feldspektrometrieklassen (Kap.5.1.) basieren auf den spektralen Eigenschaften der Oberflächen, die wiederum von der Geomorphologie, der Vegetationsbedeckung, der Feuchtigkeit und der Pedologie beeinflusst werden. Diese Parameter variieren innerhalb der einzelnen Lena-Delta Terrassen (s. Kap.3.1.2). Deshalb wurde versucht, die einzelnen Klassen nicht nur bestimmten Oberflächenstrukturen sondern auch den geomorphologischen Einheiten des Lena-Deltas zuzuordnen. Die spektralen Signaturen nahezu aller Klassen werden im Wesentlichen durch die Art und den Zustand des Pflanzenbestandes beeinflusst. Dies wird vor allem am Verlauf der Kurven im VIS und NIR des elektromagnetischen Spektrums deutlich (vgl. auch Kap.2.4.3.). Die Vegetationsbedeckung wird dabei durch die geomorphologische, pedologische sowie hydrologische Situation bestimmt. Dadurch ist es möglich die spektralen Signaturen nach spezifischen Oberflächenformen und periglazialen Strukturen zu kategorisieren (Tab.3, Abb.47). Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Aussagen zu den jeweiligen Oberflächencharakteristiken zu treffen. Mit geringerer Vegetationsbedeckung nimmt der Einfluss des Untergrundes auf den Kurvenverlauf der Spektren und die Reflexion zu (vgl. Klasse IV, Kap.5.1.1.). Bei der Auswertung der Feldspektren musste demzufolge immer bedacht werden, dass es sich im weitesten Sinne um Mischsignaturen aus Vegetation und Boden handelt. Im Kapitel 5.1. wurden bereits die Feldspektren im Zusammenhang mit den Oberflächenbedingungen der einzelnen Klassen erläutert.

Eine erste automatische Sortierung der Profilspektren wurde mit Hilfe der unüberwachten Klassifikation erzielt (vgl. Kap.4.4.3). Auf Grund der vom Rechner gesteuerten ISODATA Cluster Methode konnte eine weitestgehende Objektivität für die Durchführung der Klassifizierung gesichert werden. Zusätzlich bot die Methode des *continuum removal* eine sehr gute Möglichkeit zur objektiven Differenzierung der Spektren anhand der verschiedenen Absorptionseigenschaften (s. Kap.5.1.1.). Allerdings muss die Einteilung der Klassen kritisch betrachtet werden, da es sich bei der allgemeinen visuellen Auswertung der Feldspektren um eine subjektive Bewertung seitens des Betrachters handelt. Zum anderen ist auch die Probenzahl der Feldspektrometerdaten auf Grund von räumlichen und zeitlichen Rahmenbedingungen sowie häufig schlechten Wetterbedingungen während der Feldkampagne beschränkt.

**Tab.4:** Zusammenfassende Übersicht und Auflistung der Feldspektrometrieklassen nach den geomorphologischen Deltaterrassen und spezifischen Oberflächencharakteristiken

Klasse	Spektrale Signatur	Lena-Delta Terrasse	Oberflächenstruktur und -charakteristik
I	Bkh5d	3.Terrasse	Oberfläche relativ trocken, ebenes Relief, keine Polygonstruktur an der Oberfläche, nahezu einheitliche Verbreitung von <i>Salix sp.</i> , Gräsern und Moosen
II	Bkh5c	3.Terrasse	Alassenke, Trockenfallen der Senke mit Auslaufen des Alassees, zahlreiche Thermokarsthügel, einheitliche Verbreitung hoher Gräser, auf den Hügeln mehr <i>Salix sp.</i>
III	T010, T012, T050	2.Terrasse	<i>low-centre</i> Polygontundra, Polygonzentren feucht bis sehr feucht, Polygonwälle besser drainiert, Zentren mit Seggen, Gräsern und feuchten Moosen, Wälle mit trockenen Moosen, Flechten, Kräutern und Zwergsträuchern
IV	T008, T048	2.Terrasse	sandige exponierte Plateauflächen mit geringer Vegetationsbedeckung, sehr trockener Untergrund, einzelne Flechten, Moose, Kräuter, Zwergsträucher oder Gräser
V	T049	2.Terrasse	Alaswälle großer Thermokarstsenken, homogene Hummock-Oberfläche, sandig trockener Untergrund, geschlossene Bedeckung von trockenen Moosen, Krustenflechten, Kräutern
VI	T051a, T019	2.Terrasse	große ausgedehnte Thermokarstsenken, feuchte bis sehr feuchte Oberflächenbedingungen, teils undeutliche bis deutliche Polygonstruktur, Vegetation geprägt durch Seggen, Moosen und <i>Salix sp.</i>
VII	T051b	2.Terrasse	versumpfte, verlandete Randbereiche von Alasseen, Flachwasserbereiche, dominierende Verbreitung von <i>Arctophylla sp.</i> und <i>Sphagnum sp.</i>
VIII	T052	1.Terrasse	breite Schwemmholzsäume markieren jährliche und episodische Überflutungsbereiche
IX	Sam2, Sam3a, Sam3b	1.Terrasse	hohe nicht mehr überflutete Terrassenniveaus, häufig verbreitete <i>low-centre</i> Polygonstruktur, Untergrund sandig und feucht, Vegetation wird dominiert von Gräsern, Zwergsträuchern, Kräutern und Moosen
X	T053a, T053b, T054	1.Terrasse	episodische höhere Überflutungs- und Auenbereiche, relativ trockene bis sehr feuchte Oberflächenbedingungen, Vegetation wird vorrangig gebildet aus Gräsern, Seggen und <i>Salix sp.</i> sowie Moosen
XI	Sam4, T011a	1.Terrasse	jährliche niedere Auen- und Überflutungsbereiche, feuchte, mäßig drainierte Oberflächen, teilweise geringe Vegetationsbedeckung, Seggen, Moose, <i>Salix sp.</i> sowie Wollgräser
XII	T011b	1.Terrasse	jährliche niedere Auen- und Überflutungsbereiche, sehr feuchte Oberflächenbedingungen, geschlossene Bedeckung, hydrophile Gräser dominieren



**Abb.47:** Gesamtübersicht zu den spektralen Signaturen der einzelnen Feldspektrometrieklassen. Nähere Beschreibungen und genauere Darstellungen siehe Kap.5.1.1.

Das auf den spektralen Oberflächeneigenschaften basierende Klassifikationsergebnis deutet auf eine gute spektrale Separation verschiedener periglazialer Strukturen und Oberflächenformen (Abb.47). Dabei charakterisieren die spezifischen Kurvenverläufe die Oberflächenbedingungen der einzelnen Klassen. Dies wird anhand verschiedener Reflexionswerte sowie Wasser, Chlorophyll oder Cellulose bedingter Absorptionseigenschaften deutlich.

Aus den generellen Reflexionswerten spektraler Signaturen kann auf den Zustand der Vegetation und der Oberfläche geschlossen werden. CECCATO et al. (2001) zeigen, dass aus den Reflexionseigenschaften von Blättern im NIR und SWIR Aussagen zum Wassergehalt der Blätter getroffen werden können. STOW et al. (1993) beschreiben eine Zunahme der Reflexion mit gleichzeitiger Zunahme grüner Vegetation an Unterhängen von Hügeln in Alaska. Mit höherer Bodenfeuchte in Senkenpositionen sinken die

Reflexionswerte wieder. ROCK et al. (1988) erläutern eine Abnahme der Reflexion von Fichten mit zunehmender ökologischer Zerstörung der Wälder.

Auf Grund des beschränkten Datensatzes und kaum bzw. nicht vorhandenen Vergleichsdaten erwies es sich trotz der genannten Erkenntnisse als schwer über die Gesamtreflexionen der Spektren konkrete Aussagen zum Zustand der Vegetation oder den Oberflächenbedingungen der Klassen zu treffen. Einige Profilmessungen werden stark von der sehr feuchten Oberflächensituation beeinflusst und zeigen trotz vitaler Vegetation niedrige Reflexionswerte. Dies ist beispielsweise in den Klassen IX und XI zu erkennen (s. Abb.47, Tab.4). Andere Spektren zeigen anhand hoher Reflexionen trotz der feuchten Oberflächenbedingungen vor allem den Einfluss der grünen sehr vitalen Vegetation auf die Reflexion, wie z.B. die Klassen VII und XII. Die deutliche Abnahme der Reflexion von wenig vitaler und toter Vegetation, ist an den Klassen V und VIII zu erkennen. Beide Klassen sind zusätzlich von sehr trockenen Oberflächen geprägt.

Für die Feldspektrometriemessungen in dieser Arbeit kann davon ausgegangen werden, dass die generelle Höhe der Reflexion auch sehr stark vom Bedeckungsgrad der Vegetation des jeweiligen Standortes abhängig ist. Eine geschlossene Vegetationsbedeckung dominiert die Reflexion, so dass selbst sehr feuchte Bodenbedingungen nicht in einer maßgeblichen Verringerung der Gesamtreflexion resultieren. Bei geringerer Vegetationsbedeckung wird der Einfluss der feuchten Böden auf das spektrale Signal größer und reduziert die Gesamtreflexion (WEIDONG et al. 2002). Im Allgemeinen sind die niedrigen Reflexionen der meisten Klassen auffällig (s. Abb.47).

Aussagen zu spezifischen Vegetationseigenschaften können über die Absorptionseigenschaften sowie lokale Maxima und Minima innerhalb der Kurvenverläufe im VIS und NIR des elektromagnetischen Spektrums getroffen werden (siehe auch Kap.5.1.1.). Der maximale Anstieg von spektralen Vegetationskurven am Übergang vom VIS zum NIR, der so genannte *red edge* (690 – 740nm), steht in engem Zusammenhang mit der Chlorophyllkonzentration und daher mit der Vitalität von Pflanzen. Mit abnehmender Vitalität der Vegetation, also in Stresssituationen oder mit zunehmender Alterung der Pflanzen nimmt nicht nur die Tiefe und Breite der Chlorophyllabsorption (680nm) ab, sondern es kommt zur Verflachung des *red edge* und zur Bewegung in Richtung der kürzeren Wellenlängen (CURRAN 1990, PINAR & CURRAN 1996, ROCK et al. 1988). Der Untergrund hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Reflexion innerhalb der *red edge* Region (HORLER 1983). Diese Zusammenhänge konnten auch in den spektralen Signaturen der hier vorgestellten Klassifikation beobachtet werden. Die Spektren der Klassen mit sehr vitaler, grüner Vegetation weisen steile und teils hohe Anstiege auf, die bei 740 - 750nm eine Abflachung erfahren (Abb.47). Dies ist in den Klasse II, VII und XII zu sehen. Diese Klassen weisen auch steile und tiefe Chlorophyllabsorptionen auf (s.

Abb.40). Sehr kurze oder flache *red edges* und Abflachungen bei bereits 730nm zeigen die Kurven der Klassen V, VI und X. Diese Klassen weisen flache bis mittlere Chlorophyllabsorptionen auf (Abb.40). In Anlehnung an ELVIDGE (1990) konnte in allen untersuchten Spektren zudem festgestellt werden, dass die spektralen Signaturen von Oberflächen mit grüner und vitaler Vegetation vor allem durch die Grünreflexion (etwa 550nm) und mehr oder weniger tiefe Chlorophyllabsorptionen beeinflusst werden. Dies ist beispielsweise in der Klasse II und der Klasse XI der Fall. Oberflächen mit alternder oder wenig vitaler Vegetation, wie die der Klassen V oder X zeigen flache bis keine Chlorophyllabsorptionen. Die Kurvenverläufe im Bereich zwischen 2000 – 2400nm zeigen zunehmend den Einfluss von Celluloseabsorptionen. Im Zusammenhang mit der Abnahme der Grünreflexion alternder Vegetation sind ansteigende Kurvenverläufe zwischen 400 – 680nm zu erkennen. Ausnahmen bilden die Klassen VII und XII mit ansteigenden Kurvenverläufen im VIS trotz der hohen Vitalität der Vegetation. Diese sind vermutlich verbunden mit der Pigmentierung der hier vorkommenden Pflanzenarten (z.B. rötliche *Arctophylla sp.*) (s. Kap.5.1. und Abb.47). Weiterhin konnte beobachtet werden, dass alle Spektren, die auf eine hohe Vitalität der Vegetationsbedeckung deuten, im nahen Infrarot (ab etwa 920nm) einen abfallenden Kurvenverlauf in Richtung der langen Wellenlängen zeigen.

Um Aussagen zur Feuchtigkeit und Drainagesituation der Oberflächen zu treffen, wurden unter anderem der Wasserabsorptionsbereich zwischen 1120 - 1240nm mit Hilfe eines *continuum removals* betrachtet (s. Abb.41) und mit den eigenen Kenntnissen der Oberflächensituation der einzelnen Standorte kombiniert. Aussagen zur hydrologischen Oberflächensituation nur über die Wasserabsorptionsbereiche im NIR sind allerdings kritisch, da diese Bereiche in erster Linie im engen Zusammenhang mit dem phänologischen Wasserstatus der Pflanzen stehen (ELVIDGE 1990, PU et al. 2003). Aus diesem Grunde wurde gleichzeitig die Gesamtreflexion der Spektralkurven bewertet. Innerhalb der Klassifikationsergebnisse zeigt sich das Problem zum Beispiel in der Klasse VI (Alassenken der 2.Terrasse). Die feuchte bis sehr feuchte Oberflächensituation innerhalb der Alassenken ist nur an der sehr geringen Gesamtreflexion der Spektren zu erkennen. Die Wasserabsorptionen der Kurven sind flach (Abb.47). Ein anderes Beispiel ist die Klasse II (Alassenken der 3.Terrasse). Die Wasserabsorptionen des Spektrums sind im Vergleich relativ deutlich. Die relative Trockenheit der Oberfläche kann hier nur aus der hohen Reflexion gedeutet werden. Jedoch zeigen HARRIS et al. (2005) für *Sphagnum sp.* nördlicher Moorgebiete, dass auch die Wasserabsorptionsbereiche im NIR im Zusammenhang mit der Feuchtigkeit von Oberflächen stehen. Als Beispiel dafür kann aus den eigenen Daten die Klasse VII (verlandeter, mooriger See, 2.Terrasse) angeführt werden.

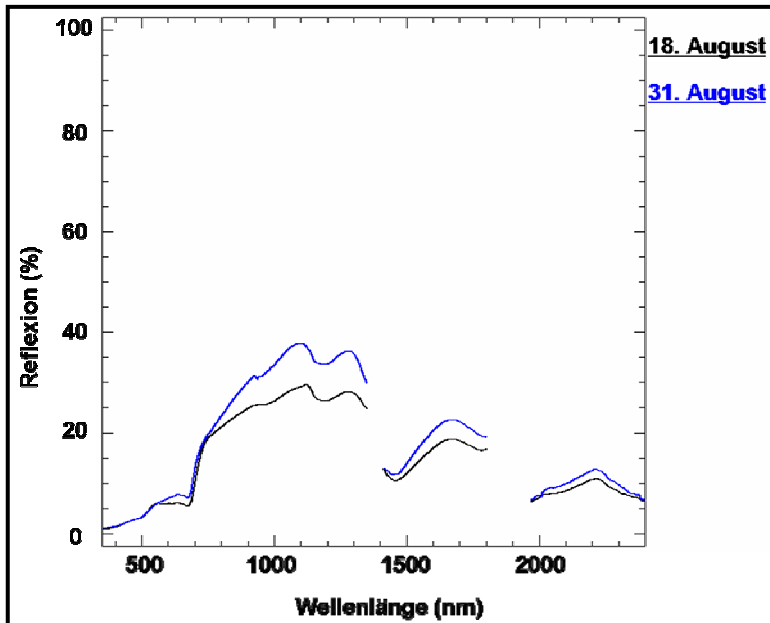


Dies zeigt, dass es nötig ist, neben den Feldspektrometriemessungen die Oberflächensituation aufzunehmen und zu beschreiben, um die Zusammenhänge der spektralen Signaturen und der dazugehörigen Oberflächentypen zu verstehen (CURTISS & GOETZ 1994, MILTON 1987).

Limitierende Faktoren bei der Durchführung der Feldspektrometrie ergeben sich aus der schwierigen Logistik von Feldkampagnen in arktischen Regionen. Damit verbunden sind häufig die beschränkten Aufenthaltsmöglichkeiten durch die schlechte Zugänglichkeit, die Entfernung und das Klima polarer Gebiete.

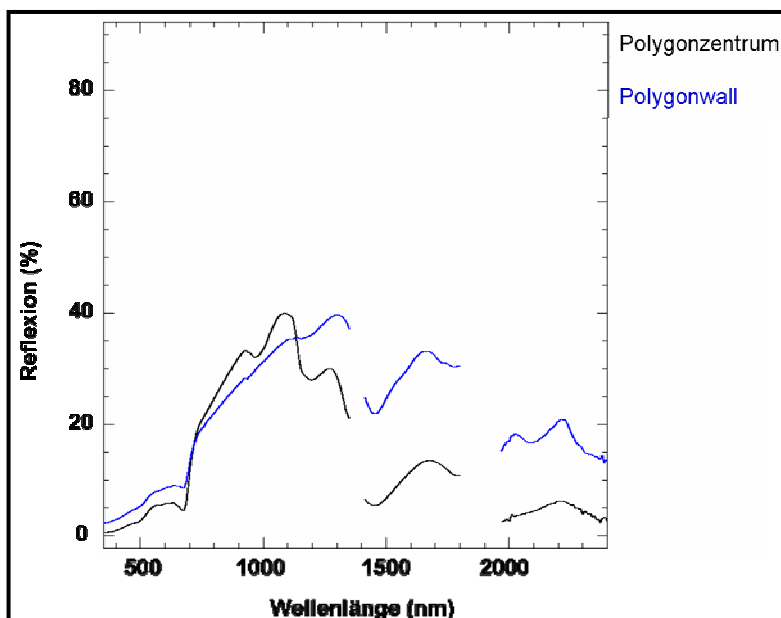
Ein entscheidender limitierender Faktor bei der Aufnahme von Feldspektren periglazialer Oberflächen in den polaren Küstenregionen der Laptev-See sind die oft anhaltenden schlechten Wetterbedingungen und damit verbundene hohe Bewölkungsgrade (s. Kap.3.1.1.). Hinzu kommt ein durchschnittlich sehr niedriger Sonnenstand. Durch den längeren Weg der Sonneneinstrahlung durch die Atmosphäre verstärkt sich der Einfluss von Streuung und atmosphärischer Absorption auf die spektralen Signaturen (s. Kap.2.4.2.) (MILTON 1987, SALISBURY 1998). Zudem hat die häufig wechselnde Bewölkung einen signifikanten Einfluss auf die Variabilität der Albedo von Tundraoberflächen (HOPE et al. 1991). Die Streuung und Absorption des Lichtes verbunden mit den häufig wechselnden Strahlungsverhältnissen, aber auch die Streuung des Lichtes auf Grund der Rauigkeit der Oberfläche, kann zu Fehlern bei feldspektrometrischen Messungen führen (CURTISS & GOETZ 1994, MILTON 1987, MILTON et al. 1995). Wie in Kapitel 4.1.1. beschrieben, wurde versucht, diese Fehler durch häufige Kalibrierung und Referenzierung des Feldspektrometers zu minimieren und die Zeitpunkte der Messung auf sonnige, wolkenfreie Aufnahmebedingungen zu beschränken. Das Fehlen vergleichbarer Datensätze macht es schwer Störungen und Fehler innerhalb der eigenen Daten abzuschätzen oder eine Quantifizierung der Genauigkeit durchzuführen. Jedoch werden die Daten nach intensiver Auswertung und im Vergleich mit vorhandener Literatur als gut eingeschätzt.

Neben den variierenden Beleuchtungssituationen können die Alterung der Vegetation und die phänologischen Veränderungen während der Wachstumsperiode als weitere Einflussfaktoren auf spektrale Signaturen angeführt werden (VAN TIL et al. 2004). Abbildung 48 zeigt diesen Effekt für eine Aufnahme der gleichen Oberfläche vom 18.August und 31.August. Im Verlauf der Kurven, vor allem im Bereich bis 1000nm, sind Alterung und abnehmende Vitalität der Vegetation gut zu erkennen. Indem nur Spektren mit ähnlichen Aufnahmezeitpunkten zusammengefügt wurden, wurde dies bei der Klassifikation der Feldspektren berücksichtigt. Stark abweichende Daten wurden nicht verwendet.



**Abb.48:** Veränderung der spektralen Signatur einer Oberfläche durch die phänologische Alterung der Vegetationsbedeckung am gleichen Standort (Ebe-Basyn-Sise, episodischer Überflutungsbereich, Messung: T009, T053, s. Anhang 1)

Mit der Feldspektrometrie besteht die Möglichkeit auch die typischen kleinräumigen Variationen der Oberflächenbedingungen in Tundralandschaften anhand spektraler Eigenschaften zu untersuchen. So unterscheiden sich die spektralen Signaturen eines Polygonwalls und Polygonzentrums des gleichen Polygons meist sehr deutlich (Abb.49).



**Abb.49:** Die spektralen Signaturen des Polygonwalls und des Polygonzentrums eines Polygons weisen auf die messbaren sehr kleinräumigen Unterschiede in Tundralandschaften hin. (Messstandort T010, s. Anhang 1)

Zur Untersuchung von detaillierten spektralen Eigenschaften von Oberflächen in arktischen und auch subarktischen Gebieten gibt es bisher nur wenige Arbeiten. Diese beschränken sich meist auf die Erfassung allgemeiner Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsgesellschaften in der Tundra. Beispielsweise verwenden HOPE et al. (1993) und STOW et al. (1993) sehr gering aufgelöste Feldspektrometriedaten und vergleichen diese mit SPOT HRV-XS Satellitendaten für die Erfassung von Reflexionen verschiedener Tundravegetationen. Der von ihnen aus Rot- und NIR-Reflexion errechnete Vegetationsindex (NDVI) zeigt Abhängigkeiten von Hangpositionen, der damit verbundenen Vegetationsgesellschaften und Oberflächenbedingungen. HOPE et al. (1991) und PETZOLD & RENCZ (1975) untersuchen die Albedo verschiedener arktischer und subarktischer Oberflächen in Abhängigkeit von Oberflächenbedingungen oder auch Bewölkungssituationen. REES et al. (2004) untersuchen die spektralen Eigenschaften subarktischer Flechten. Mit der Verwendung eines hoch auflösenden Feldspektrometers (GER3700) konnten detaillierte Aussagen zu spektralen Absorptionseigenschaften verschiedener Flechtenarten getroffen werden. Diese Arbeiten sind mit den eigenen feldspektralen Daten nur bedingt vergleichbar, bieten allerdings weitere grundlegende Erkenntnisse aus polaren Gebieten. Für den gemäßigten und vor allem mediterranen Raum gibt es zahlreiche Arbeiten zu spektralen Eigenschaften verschiedenster Vegetationstypen oder Oberflächen. Häufig liegt der Fokus dabei auf der detaillierten Erfassung verschiedenster Parameter wie Bodenfeuchtigkeit, Menge von Pflanzenbestandteilen (z.B. Wasser, Cellulose, Chlorophyll), Vitalität der Vegetation usw. Einige dieser Erkenntnisse konnten im Zusammenhang mit den eigenen hier dargestellten Daten diskutiert werden und waren hilfreich bei der Bewertung der Oberflächensituation anhand der eigenen spezifischen Kurvenverläufe.

Die detaillierte Aufnahme hoch aufgelöster feldspektraler Daten in Verbindung mit periglazialen Oberflächenformen in den arktischen Gebieten der Laptevseeregion ist in dem hier dargestellten Umfang bisher einmalig. Vergleichbare Datensätze aus dem Laptevseegebiet stehen bis zum derzeitigen Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Somit stellen die hier vorgestellten Daten auch für andere Tundragebiete einen einmaligen Vergleichsdatensatz dar.

## **6.2. Geomorphologische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes anhand der Landsat-7 ETM+ Oberflächenklassifikation**

Die Durchführung der überwachten Landsat-7 ETM+ Klassifikation diene der Quantifizierung verschiedener Oberflächentypen und periglazialer Strukturen bezogen auf die geomorphologischen Haupteinheiten des Lena-Deltas. Für das Hauptuntersuchungsgebiet konnten 15 Oberflächenklassen differenziert werden, die sich anhand der Vegetationsbedeckung, der Drainagesituation und der geomorphologischen Strukturen oder periglazialen Formen unterscheiden. Mit dieser Klassifikation besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Oberflächenklassen beispielsweise im Zusammenhang mit Stoff- und Energieflüssen oder der Degradation von Permafrost, z.B. die Verbreitung von Thermokarst, in Verbindung zu bringen. Vergleichbare Landbedeckungsklassifikationen mit Landsat-7 Daten sind für nordostsibirische Untersuchungsgebiete bereits zuvor am AWI-Potsdam durchgeführt worden (GROSSE et al. 2006, SCHNEIDER 2005).

Die Untersuchung fokussiert auf ein kleines Teilgebiet im Nordwesten des Lena-Deltas, das die wesentlichen geomorphologischen Haupteinheiten des Deltas in unterschiedlichen Anteilen enthält (s. Kap.5.2., Tab.2). Demzufolge können die Aussagen über die Verteilung der hier klassifizierten Oberflächen nur als exemplarisch betrachtet und nicht auf das gesamte Delta übertragen werden. Das Ergebnis und die Genauigkeit der Klassifikation werden auf Grund der umfangreichen Geländekenntnisse im Hauptuntersuchungsgebiet und den zusätzlich zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten und Geländemodellen als gut eingeschätzt. Eine Diskussion zu möglichen Fehlerquellen wurde bereits im Kapitel 5.3.3. angeführt.

Eine Fehlklassifikation besteht möglicherweise bei der Klasse 8 (höher gelegene Überflutungsbereiche), deren Trainingsgebiete auf der 1.Terrasse zu finden sind. Klasse 8 weist dennoch mit 11,6% einen relativ großen Anteil an der Klassenverteilung der 3.Terrasse auf (s. Abb.45). Für diese Klasse sollte nach einer detaillierten Analyse der Standorte auf der 3.Terrasse und deren Vergleich mit denen der 1.Terrasse eine weitere Auftrennung der Klasse in Betracht gezogen werden. Eine bessere Klassentrennung ist auch bei der Klasse 6 (Auenbereiche sowie Bachtäler der 3.Terrasse) nötig. Die in dieser Klasse zusammengefassten Flächen sind auf zwei verschiedenen Deltaeinheiten zu finden. Diese Schwierigkeiten ergeben sich häufig daraus, dass ähnliche Oberflächenbedingungen zu ähnlichen spektralen Charakteristiken führen. Eine weitere Unsicherheit besteht bei der Klasse 15. In der visuellen Auswertung des Satellitenbildes zeigten diese Bereiche sehr hohe Reflexionen. Sie umgeben größtenteils die Bachtäler der 3.Terrasse und zeigen süd-/südwestliche Expositionen. Sie wurden daraufhin als gut

drainierte trockene Hangbereiche der 3.Terrasse klassifiziert. Die hohe Reflexion könnte aber zum Teil auch auf die exponierte Lage der Flächen im Bezug auf den Aufnahmewinkel des Sensors und die Beleuchtung zurückgeführt werden. Gute eindeutige Ergebnisse zeigen vor allem die Klassen 12, 13 und 14, die trockene, weniger feuchte Oberflächen repräsentieren. Dies wird durch die dominante Verbreitung der Klassen 12 und 13 auf der 2.Terrasse und der Klasse 14 auf der 3.Terrasse bestätigt (s. Abb.19 und 21). Für eine genauere Differenzierung der geomorphologischen Strukturen und Formen des Deltas sind neben weiteren Felderkundungen auch höher spektral sowie räumlich aufgelöste Fernerkundungsdaten nötig. Die Landsat-7 Pixelgröße (30m) verhindert eine weitergehende detaillierte Betrachtung der kleinräumig sehr heterogenen Periglaziallandschaften des Deltas. Geomorphologische und hydrologische Bedingungen variieren auch innerhalb der 30m-Auflösung (z.B. GROSSE et al. 2006). Diese Variationen basieren vor allem auf der typischen Tundraoberflächenform der Eiskeilpolygone mit je ca. 8 – 20m Durchmesser. Die ruft wiederum hydrologische, pedologische und vegetative Besonderheiten hervor. Ein weiterer Faktor sind starke Reliefunterschiede innerhalb geringer Entfernungen von wenigen Metern durch Permafrostdegradation, die ebenfalls zu heterogenen Oberflächeneigenschaften führen. Ein Beispiel dafür ist initialer Thermokarst über austauenden Eiskeilen entlang von Polygonrändern. Demzufolge wäre die Initiierung von Thermokarst in Landsat-7 Satellitenbilder erst mit zunehmender Ausdehnung zu erkennen. Die hier dargestellte Klassifikation kann also nur einen Einblick über die großräumigen Verteilungen verschiedener Oberflächenverhältnisse geben.

In Kapitel 5.3.2. wurde bereits die Verteilung der Klassen bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes und die verschiedenen geomorphologischen Einheiten bewertet. Zur Bewertung der Genauigkeit der Klassifikation wurde die räumliche Verteilung der Klassen auf den geomorphologischen Lena-Delta Terrassen und in den Thermokarstsenken herangezogen. Die Felduntersuchungen bestätigen, dass die Klassenverteilung die Oberflächencharakteristiken der geomorphologischen Einheiten gut widerspiegeln (s. Abb.45) und somit die Klassifikation eine hohe Genauigkeit aufweist. Allerdings kann dies nur mit unabhängigen Daten verifiziert werden, die vorher nicht in die Klassifikation einbezogen wurden.

SCHNEIDER (2005) führte eine Landbedeckungsklassifikation zur Bilanzierung von Methanemissionen für das gesamte Lena-Delta durch. Dabei wurden 10 Klassen nach Vegetationsbedeckung und Feuchtigkeit der Oberfläche unterschieden. Geomorphologische Situationen wurden jedoch weniger stark berücksichtigt. Das Klassifikationsergebnis konnten mit der hier vorliegenden Klassifikation gut verglichen werden. Für das Hauptuntersuchungsgebiet konnten einige Oberflächentypen jedoch genauer differenziert und bewertet werden. Bei SCHNEIDER (2005) werden die Klassen

hinsichtlich ihrer Methanproduktion bewertet. Methan gilt als Treibhausgas und leistet neben Kohlendioxid einen großen Beitrag zur globalen Klimaerwärmung. Die Feuchtigkeit einer Oberfläche spielt dabei eine große Rolle in Bezug auf mögliche Methanemissionen. Eine wesentliche Erkenntnis der Klassifikation ist die Dominanz feuchter Oberflächen im Lena-Delta, vor allem auf der 1.Terrasse des Deltas und die dominante Verbreitung wenig feuchter Oberflächen auf der 2. und 3.Terrasse. Diese Verteilung von Feuchtstandorten kann anhand der eigenen Daten bestätigt werden. Jedoch wurden von SCHNEIDER (2005) vor allem auf der 1.Terrasse einige Bereiche als trocken klassifiziert, die in der hier vorliegenden Klassifikation für das Hauptuntersuchungsgebiet als Klassen ausgewiesen werden, die eher feuchte Oberflächen repräsentieren. SCHNEIDER (2005) betrachtet des Weiteren vor allem die Klasse „*feuchte von Seggen und Moosen dominierte Tundra*“ als Hauptquelle für Methanemissionen im Lena-Delta. Die Verbreitung dieser Klasse liegt für das eigene Hauptuntersuchungsgebiet vor allem im Bereich der Thermokarstsenken der 2.Terrasse und im holozänen Alluvium der 1.Terrasse (vgl. Abb.42). Sie wird in der hier vorliegenden Klassifizierung durch die Klassen 5, 9, 10 und 11 weiter differenziert, die ebenfalls für feuchte bis sehr feuchte, teils vermoorte und versumpfte Oberflächen stehen. Die durch diese Klassen repräsentierten Oberflächentypen unterscheiden sich vor allem in der Ausprägung polygonaler Strukturen. Da Polygonwälle deutlich besser drainiert werden als Polygonzentren und deshalb meist geringere Methanemissionen aufweisen (WAGNER et al. 2003), wirkt sich die Verbreitung von Polygontypen und –größen auf die Methanemission aus. Die hier vorliegende genauere Differenzierung der Klasse „*feuchte von Seggen und Moosen dominierte Tundra*“ (SCHNEIDER 2005) kann deshalb für eine Verfeinerung der Methanbilanzierung verwendet werden.

Mit Hilfe der durchgeführten Klassifikation und den geomorphologischen sowie pedologischen Felduntersuchungen sollen noch einmal die Bereiche der Thermokarstsenken näher betrachtet werden. Die Auswertung von Satellitenbildern bietet ein großes Potential zur Untersuchung und Überwachung von Thermokarst. GROSSE et al. (2005, 2006) untersuchten anhand verschiedener Satellitendaten die Verbreitung von Thermokarst für periglaziale küstennahe Tiefländer in NO-Sibirien. Dabei wurde festgestellt, dass in sehr großen Gebieten, über 50% der Flächen durch Permafrostdegradation beeinflusst werden. Dabei handelt es sich allerdings meist um sehr eisreiche Ablagerungen, wie sie in der 3.Terrasse des Lena-Deltas vorkommen (s. Kap.3.1.2.). Im Hauptuntersuchungsgebiet wurde die weiträumige Verbreitung aktiver lateraler Permafrostdegradation (Thermo-Erosionstäler) an den Rändern der 3.Terrasse beobachtet und stellenweise kartiert (s. Abb.3 und Abb.42). Die 2.Terrasse des Untersuchungsgebietes weist vor allem einen sehr großen Anteil an hauptsächlich vertikaler Permafrostdegradation auf (vgl. Kap.2.2.2.). Mehr als die Hälfte der

untersuchten Fläche der 2.Terrasse werden durch Thermokarstsenken eingenommen (Abb.42). Diese Thermokarstsenken sind vermutlich während des holozänen Wärmeoptimums entstanden (s. Kap.3.2.) (FRENCH 1974). Die Thermokarstprozesse sind heute jedoch weitestgehend inaktiv (GRIGORIEV 1993, GALABALA 1987). Die untersuchten Torfe und niedermoorigen Böden innerhalb der Senken am Rande der Thermokarstseen (s. Kap.5.4.) deuten auf die Verlandung der Seen und die relative Oberflächenstabilität der Senken auf der 2.Terrasse. Parallel zu den Seen verlaufende Polygonwälle kennzeichnen vermutlich ehemalige Uferlinien und lassen auf die Verkleinerung der Seeflächen schließen. Zur Bestimmung wechselnder Oberflächenbedingungen (Vegetation, Bodenfeuchte u.a.) zum Beispiel auf Grund von Thermokarst sind Auswertungen von Satellitendaten verschiedener Aufnahmezeitpunkte über längere Zeiträume notwendig. Anhand vergleichender Landbedeckungsklassifikationen könnten langfristige Veränderungen auch im Zusammenhang mit Stoff- und Energieflüssen quantifiziert werden (REES et al. 2003, STOW et al. 2004).

Die Böden und Vegetationstypen innerhalb der Thermokarstsenken lassen ein hohes Potential für Methanemissionen vermuten. Die Thermokarstsenken des Untersuchungsgebietes setzen sich vor allem aus den Klassen 10 (sehr feuchte Bereiche und/oder Thermokarstdepressionen mit polygonaler Struktur und stehendem Wasser, Seggen, Moose, weniger *Salix sp.*), 11 (Thermokarstdepressionen und/oder feuchte Bereiche mit undeutlicher Polygonstruktur und weniger stehendem Wasser, *Salix sp.*, Seggen, Moose) und 9 (sehr feuchte Bereiche in Senken und Überflutungsbereiche mit stehendem Wasser, Moose und Seggen) zusammen. Entsprechend der von SCHNEIDER (2005) durchgeführten Klassifikation können für diese Klassen hohe Emissionsraten angenommen werden (s.o.). Auch die weite Verbreitung hydromorpher Böden (Abb.46, vgl. auch Kap.5.4.) deutet auf erhöhte Methanfreisetzungen innerhalb der Alassenken (WAGNER et al. 2003). Für eine erhöhte Methanemission spricht zudem die innerhalb der Thermokarstsenken verbreitete Vegetation mit Seggen und Moosen. KUTZBACH (2000) stellt eine positive Korrelation von Methanemission mit der Dichte von *Carex*-Trieben innerhalb von Polygonzentren fest. Die Höhe der Methanemission ist jedoch von zahlreichen Faktoren, wie Temperatur, Wasserspiegel, Vegetation, pH-Wert oder saisonale Auftautiefe u.a. abhängig (z. B. MACDONALD et al. 1998, MORRISSEY & LIVINGSTON 1992, WAGNER et al. 2003). Die hier dargestellte Klassifikation lässt demzufolge die Quantifizierung möglicher Methanemissionsraten anhand der berechneten Flächenanteile nur beschränkt zu, da sie in erster Linie zur Klassifizierung verschiedener periglazialer Strukturen und geomorphologischer Oberflächenformen durchgeführt wurde. Auf dieser Grundlage könnte dennoch eine Bilanzierung der Methanemission im



Zusammenhang mit der geomorphologischen Unterteilung im Untersuchungsgebiet versucht werden.

### **6.3. Vergleich von Feldspektrometrie- und Landsat-7 Satellitendaten**

Ein Problem bei der Auswertung von Satellitendaten stellt die Ungenauigkeit der Ergebnisse dar. Dies steht häufig mit einer zu geringen räumlichen sowie spektralen Auflösung der Daten in Zusammenhang. Die Feldspektrometrie bietet eine ausgezeichnete Methode Landbedeckungsklassifikationen, die auf Basis von Fernerkundungsdaten erstellt wurden, zu verbessern und zu verfeinern. Die in dieser Arbeit angewendeten Methoden der Satellitenbilddauswertung und der Feldspektrometrie ergänzen sich hervorragend. Mit Satellitenbildern ist es möglich, die spektralen Charakteristiken verschiedener Oberflächentypen großflächig zu erfassen. Mit Hilfe von Feldspektrometern können hoch aufgelöste spektrale Informationen und Eigenschaften verschiedener auch kleinräumig wechselnder Oberflächen, wie die von Polygonlandschaften in periglazialen Gebieten punktuell erfasst werden. Zur Validierung von Satellitendaten ist die Übertragung der punktuellen feldspektralen Informationen in flächenhafte Informationen nötig. Dies ist hier geschehen mit Hilfe von Profilmessungen und von Mittelwertbildungen der im Feld akquirierten Daten. Anhand der feldspektralen Signaturen können somit genauere Aussagen zur Reflexion von Oberflächen gemacht werden, die kleiner sind als die Pixelgröße des Landsat 7 Bildes. Verschiedene geomorphologische Oberflächentypen wie polygonale Strukturen sind daher mit feldspektrometrischen Methoden feiner differenzierbar. Die aus der Feldspektrometrie gewonnenen Informationen können mit Hilfe der Landbedeckungsklassifikation auf ein größeres Gebiet übertragen werden. So führte unter anderen die anhand verschiedener feldspektraler Signaturen erfasste und im Feld beobachtete Ausprägung verschiedener Polygonstrukturen zur Verfeinerung des Klassifikationsergebnisses. Polygonstrukturen sind in Landsat-7 Daten nur schwer bis gar nicht zu erkennen. Des Weiteren ergab sich aus den feldspektralen Unterschieden der geomorphologischen Hauptterrassen des Lena-Deltas auch die genauere Differenzierung dieser Bereiche in der Landsat-7 Klassifikation.

Beim Vergleich beider hier durchgeführter Klassifikationen muss aber auf die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte hingewiesen werden (Landsat-7 ETM+ Daten: Juli 2001, Feldspektrometrie: August 2005). Die zeitlichen Unterschiede können Auswirkungen auf die hydrologische Situation sowie den phänologischen Zustand der Vegetation im Untersuchungsgebiet haben, was sich beides auf die Reflexionseigenschaften der Oberflächen auswirkt. In zukünftigen Untersuchungen sollten

deshalb die zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmezeitpunkten der zu vergleichenden Datensätze minimiert werden.

Zur Festlegung der Trainingsgebiete für die überwachte Satellitenbildklassifikation (s. Kap.4.3.2.) wurden in erster Linie die geomorphologischen Felderkundungen genutzt. Diese wurden häufig parallel zu den feldspektrometrischen Messungen durchgeführt. Der direkte Vergleich spektraler Informationen aus Landsat-7 ETM+ Daten mit den feldspektralen Signaturen ist nicht sinnvoll. Grund dafür ist die geringe spektrale Auflösung der Landsat-7 Satellitendaten. Für den Bereich von 400 – 2500nm bieten diese nur 6 relativ breite multispektrale Kanäle. Bei dem hier verwendeten Feldspektrometer werden für diesen Bereich des elektromagnetischen Lichtes spektrale Informationen in 2151 Kanälen erfasst (s. Tab.1). Für einen Vergleich wären höher aufgelöste Satellitendaten nötig. Zum Beispiel verwenden GUANTER et al. (2005) Feldspektrometriedaten zur Kalibrierung und Validierung von spektral hoch aufgelösten CHRIS/PROBA Daten. RITCHIE et al. (2006) zeigen jedoch, dass auch zwischen Reflexionen verschiedener Vegetationen aus Landsat-7 Daten und ASD-Feldspektrometer Daten positive Korrelationen und somit starke lineare Beziehungen bestehen.

## 7. Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit konnten verschiedene periglaziale Strukturen und geomorphologische Oberflächenformen im Lena-Delta anhand spektraler Eigenschaften charakterisiert werden. Die Nutzung eines portablen Batterie-betriebenen Feldspektrometers bot eine ausgezeichnete Möglichkeit, hoch aufgelöste feldspektrale Signaturen zu erfassen. Die spektralen Felddaten in Kombination mit geomorphologischen, pedologischen und vegetationskundlichen Felderkundungen ermöglichten die Gewinnung eines zur Zeit einzigartigen Felddatensatz zur Analyse und Validierung von Fernerkundungsdaten im Lena-Delta. Mit Hilfe von GIS-Analysen und der Klassifikation eines Landsat-7 ETM+ Bildausschnittes war die Differenzierung verschiedener periglazialer Oberflächen möglich.

Die Klassifikation der Feldspektren zeigt die signifikanten Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften der geomorphologischen Lena-Delta Terrassen und die gute spektrale Separation der Deltaeinheiten. Die Unterschiede basieren in erster Linie auf der Vegetationszusammensetzung sowie der Bodenfeuchte. Insbesondere die Form und der Verlauf der Feldspektren (z.B.: *red edge* 690 – 740nm, Reflexionsmaxima und -minima) sowie signifikante Absorptionsbereiche (z.B.: Chlorophyll ca. 680nm, Wasser ca. 1120 – 1240nm) geben Aufschluss über die verschiedenen Oberflächenbedingungen und den Zustand und die Art der Vegetationsbedeckung. Besonders hilfreich bei der Differenzierung der individuellen spektralen Signaturen war neben intensiven visuellen Auswertungen die Methode des *continuum removal*.

Mit Hilfe der überwachten Klassifikation eines Landsat-7 Bildausschnittes und der Analyse individueller Oberflächenklassen konnte die räumliche Verteilung periglazialer Strukturen und geomorphologischer Oberflächentypen auf den Deltaterrassen bestimmt werden.

Mit den hier vorgestellten Daten steht ein Basisdatensatz für zukünftige spektrale Feldmessungen und die weitere Datenerfassung durch hyperspektrale Sensoren in den Tundralandschaften des arktischen Lena-Deltas zur Verfügung. Die Untersuchungen bieten auch einen Vergleichsdatensatz für die feldspektrometrische sowie multi- und hyperspektrale Erfassung periglazialer Oberflächen im zirkumpolaren Raum.

## 8. Ausblick und Anregung für Folgeuntersuchungen

Mit den hier vorgestellten hochauflösenden Feldspektrometerdaten aus dem arktischen Lena-Delta steht ein Vergleichsdatensatz für weitere feldspektrale Messungen in arktischen Tundren zur Verfügung. Für die detaillierte Analyse und das Verständnis spektraler Eigenschaften von periglazialen Oberflächen im Lena-Delta und generell im zirkumpolaren Raum stellt dieser Datensatz einen wichtigen ersten Ansatz bereit. Dennoch sind weitere Messungen nötig. Dabei sollte neben der Erfassung weitere Oberflächen- und Vegetationstypen vor allem auf die saisonalen und auch längerfristigen Variabilitäten der spektralen Signaturen fokussiert werden. Erst damit können Veränderungen innerhalb der Periglaziallandschaften qualitativ und quantitativ bewertet werden. Der Aufbau von Messfeldern wäre denkbar, um saisonal oder mehrjährig bedingte Variationen auf individuellen Oberflächentypen zu erfassen. Um hochauflösende Datensätze von großen Regionen zu erhalten, könnten auch Flugzeug-getragene hyperspektrale Scanner wie z.B. HyMap<sup>TM</sup> (Integrated Spectronics) zum Einsatz kommen. Für solche Ansätze sind neben der Feldspektrometrie als wichtiges Element die genaue Aufnahme der Vegetation sowie weiterer Oberflächenparameter und Felddaten notwendig für ein detailliertes *ground truthing*.

Um Wasserabsorptionen und Reflexionswerte besser zu verstehen, müssten parallel zur Spektralmessung gleichzeitige Messungen der Bodenfeuchte und des Wassergehaltes in der Vegetation erfolgen. Dies sollte mit vergleichenden spektrometrischen Labormessungen vervollständigt werden. Für zukünftige Aufnahmen wären zudem vergleichende Messungen von Vegetation und Sediment eines Standortes unter Laborbedingungen anzustreben. Dies bietet zum einen die Möglichkeit, spektrale Signaturen von Vegetation und Boden einer Oberfläche unter ungestörten, überwachten und standardisierten Bedingungen aufzunehmen und zu vergleichen. Zum anderen können zum Beispiel auch die unter Feldbedingungen stark atmosphärisch gestörten Spektralbereiche bei ca. 1400nm und 1900nm untersucht werden. Die Reflexionen dieser Bereiche lassen nähere Aussagen auch zur hydrologischen Situation des Bodens zu (WEIDONG et al. 2002). Berechnete Verhältnisse verschiedener Spektralbänder und statistische Analysen von Absorptionseigenschaften, d.h. Berechnungen von Tiefe, Breite und Lage der Absorptionsbereiche, machen die quantitative Analyse und Abschätzung chemischer und physikalischer Oberflächenbedingungen möglich (PU et al. 2003, VAN DER MEER 2004). Mit diesen Methoden kann die Lücke zwischen geochemischen und geophysikalischen Oberflächenbedingungen und Fernerkundung geschlossen werden.

Feldspektrale Messungen können mit spektral hoch aufgelösten Satellitenbildern verglichen werden, wodurch eine Übertragung von Feldinformationen in die Fläche

ermöglicht wird. Beispielsweise wären der Vergleich und die Validierung von CHRIS/PROBA Satellitenbildern der ESA möglich. Diese bieten hyperspektrale Daten mit guten räumlichen Auflösungen von bis zu 18m. Am AWI-Potsdam stehen aktuelle CHRIS/PROBA Satellitenbilder für Teile des Lena-Deltas zur Verfügung. Weitere Beispiele für räumlich hochauflösende multispektrale Satellitensensoren sind IKONOS (4m multispektral, 1m panchromatisch) oder QuickBird Satellitenbilder (2,44m multispektral, 0,66m panchromatisch). Mit solchen sehr hoch aufgelösten Fernerkundungsdaten ist auch eine bessere Differenzierung der kleinräumig heterogenen periglazialen Strukturen und Landschaften möglich. Dies wiederum lässt genauere Bilanzierungen von Stoff- und Energieflüssen sowie auch eine zukünftige Überwachung der periglazialen Oberflächentypen und Vegetationseinheiten unter den prognostizierten Klimaszenarios für die Arktis zu. Mit der Feldspektrometrie kann das Verständnis der Eigenschaften von periglazialen Oberflächen deutlich verbessert werden.

## 9. Literaturverzeichnis

- AG Boden (1994). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchgesellschaft, Stuttgart, 4. Auflage. 392 S.
- Alabyan, A.M., Chalov, R.S., Korotaev, V.N., Sidorchuk, A.U. & Zaytsev, A.A. (1995). Natural and technologic water and sediment supply to the Laptev Sea. In: Kassens, H., Piepenburg, D., Thiede, J., Timokhov, L., Hubberten, H.-W. & Priamikov, S.M. (Hrsg.). *Russian-German Cooperation: Laptev Sea System. Reports on Polar Research 176*. S. 265 – 271.
- Albertz, J (2001). *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 250 S.
- Alekseev, M.N. & Drouchits, V.A. (2004). Quarternary fluvial sediments in the Russian Arctic and Subarctic: Late Cenozoic development of the Lena River system, northeastern Siberia. *Proceedings of the Geologist's Association 115*. S. 339 – 346.
- Analytical Spectral Devices (2004). <http://www.asdi.com>.
- Are, F. & Reimnitz, E. (2000). An overview of the Lena River Delta setting: Geology, Tectonics, Geomorphology and Hydrology. *Journal of Coastal Research 16*. S. 1083 – 1093.
- Blümel, W.D. (1999). *Physische Geographie der Polargebiete*. Teubner Studienbücher der Geographie. Stuttgart, Leipzig. 239 S.
- Boike, J. & Yoshikawa, K. (2003). Mapping of periglacial geomorphology using kite/ballon aerial photography. *Permafrost and Periglacial Processes 14*. S. 81 - 85.
- Carson, Chas.E. (2001). The oriented thaw lakes: A Retrospective. In: Norton, D.W. (Hrsg.). *Fifty More Years Below Zero, Tributes and Meditations for the Naval Arctic Research Laboratory's First Half Century of Barrow, Alaska*. Arctic Institute of North America, Calgary, AB, Canada. S. 129 – 137.
- CAVM Team (2003). *Circumpolar Arctic Vegetation Map, Scale 1:7.500.000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No.1*. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska. <http://www.geobotany.uaf.edu/cavm/finalcavm/index.html>.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S. & Gregoire, J.M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment 77*. S. 22 – 33.
- Chabrilat, S., Kaufmann, H., Merz, B., Mueller, A., Bens, O. & Lemnitz, C. (2003). Development of relationships between reflectance and erosion modelling: Test site preliminary field spectral analysis. Presented at the 3<sup>rd</sup> EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May 13-16 2003. S. 165 – 172.

- Chernov, Yu.I. & Matveyeva, N.V. (1997). Arctic ecosystem in Russia. In: Wielgolaski, F.E. (Hrsg.). *Ecosystems of the world 3: Polar and Alpine Tundra*. Elsevier Science B.V., Amsterdam. S. 361 – 507.
- Clark, R.N. & Roush, T.L. (1984). Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research* 89. S. 6329 – 6340.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M. & Swayze, G.A. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research* 95 (B8). S. 12653 – 12680.
- Clark, R.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (Hrsg.). *Remote sensing for the earth science - Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 3. Auflage. S. 3 – 58.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Kokaly, R.F. & Sutley, S.J. (2004). USGS Digital spectral library splib05a. US Geological Survey, Denver. <http://speclab.cr.usgs.gov/browse.html>.
- Czudek, T. & Demek, J. (1970). Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief. *Quaternary Research* 1. S. 103 - 120.
- Curran, P.J., Dungan, J.L. & Gholz, H.L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology* 7. S. 33 – 48.
- Curtiss, B. & Goetz, A.F.H. (1994). Field spectrometry: Techniques and instrumentation. Presented at the International Symposium on Spectral Sensing Research, July 1994. S. 31 – 40.
- Cutter, M.A. & Johns, L.S. (2005). Chris Data Format. Sira. 31 S. <http://earth.esa.int/missions/thirdpartymission/proba.html>.
- Davies, J.L. (1969). *Landforms of Cold Climate - A Introduction to Sytematic Geomorphology*. The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 3. Auflage. 200 S.
- Dierßen, K (1996). *Vegetation Nordeuropas*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 838 S.
- Elvidge, C.D. (1990). Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal Remote Sensing* 11. S. 1775 – 1795.
- ENVI (2004). *ENVI User`s Guide*. Research Systems Inc, USA.
- ESA (2006). Data Exploitation Web Site. <http://www.rsac1.co.uk/chris/>. (das ist aber keine ESA website)
- Etzelmüller, B., Ødegård, R.S., Berthling, I. & Sollid, J.L. (2001). Terrain parameters and remote sensing data in the analysis of permafrost distribution and periglacial



- processes: Principles and examples from Southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 12. S. 79 - 92.
- Everdingen, R.O.v. (Hrsg) (2005). *Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. International Permafrost Association, Calgary. <http://nsidc.org/fgdc/glossary>.
- Everett, K.R., Vassiljevskaya, V.D., Brown, J. & Walker, B.D. (1981). Tundra and analogous soils. In: Bliss, L.C., Heal, O.W. & Moore, J.J. (Hrsg.). *Tundra ecosystems - a comparative analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney. S. 139 – 179.
- FAO (1998). *World Reference Base for Soil Resources*. International Society of Soil Science, International Soil Reference and Information Centre, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom. 91 S.
- French, H.M. (1974). Active thermokarst processes, Eastern Banks Island, Western Canadian Arctic. *Canadian Journal of Earth Science* 11. S. 785 - 794.
- French, H.M. (1996). *The Periglacial Environment*. Longman, Harlow, 2. Auflage. 334 S.
- French, H.M. (1999). Past and present permafrost as an indicator of climate change. *Polar Research* 18. S. 269 – 274.
- French, H.M. (2000). Does Lozinski's periglacial realm exist today? A discussion relevant to modern usage of the term „Periglacial“. *Permafrost and Periglacial Processes* 11. S. 35 – 42.
- Frey, W. & Lössch, R. (2004). *Lehrbuch der Geobotanik - Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit*. Elsevier GmbH, München, 2. Auflage. 528 S.
- Galabala, R.O. (1987). New data on the Lena-Delta structure. *Quaternary of North-East USSR, Magadan*. S. 152 – 172. (in Russisch).
- Galabala, R.O. (1997). Perelekti and the initiation of glaciation in Siberia. *Quaternary International* 41/42. S. 152 – 171.
- Goryachkin, S.V., Karavaeva, N.A., Targulian, V.O. & Glazov, M.V. (1999). Arctic Soils: Spatial distribution, zonality and transformation due to global change. *Permafrost and Periglacial Processes* 10. S. 235 – 250.
- Goryachkin, S.V., Blume, H.P., Beyer, L., Campbell, I., Claridge, G., Bockheim, J.G., Karavaeva, N.A., Targulian, V. & Tarnocai, C. (2004). Similarities and differences in arctic and antarctic soil zones. In: Kimble, J.M. (Hrsg.). *Cryosols - Permafrost-affected soils*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. S. 49 - 70.
- Grigoriev, M.N. (1993). Cryomorphogenesis in the Lena Delta. *Yakutsk*. 173 S. (in Russisch).
- Grigoriev, M.N., Imaev, V.S., Imaeva, L.P., Kozmin, B.M., Kunitzkiy, V.V., Lationov, A.G., Mikulenko, K.I., Skryabin, R.M. & Timirshin, K.V. (1996). *Geology, seismicity and*

- cryogenic processes in the arctic areas of Western Yakutia. Yakut Scientific Centre SD RAS, Yakutsk. 84 S. (in Russisch).
- Grigoriev, M.N. & Schneider, W. (2002). Shore erosion processes and sediment flux from eroded islands in the apex of the Lena Delta. In: Pfeiffer, E.M. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2001. S. 52 – 56.
- Grosse, G., Schirrmeister, L., Kunitzky, V.V. & Hubberten, H.W. (2005). The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: An illustration from the NE Siberian coast. *Permafrost and Periglacial Processes* 16. S. 163 - 172.
- Grosse, G., Schirrmeister, L. & Malthus, T.J. (2006). Application of Landsat-7 satellite data and a DEM for the quantification of thermokarst-effected terrain types in the periglacial Lena-Anabar coastal lowland. *Polar Research* 25. S. 51 - 67.
- Grosswald, M.G. (1998). Late-Weichselian Ice Sheets in Arctic and Pacific Siberia. *Quaternary International* 45/46. S. 3 – 18.
- Guanter, L., Alonso, L., Moreno, J. (2005). Methods for the surface reflectance retrieval from CHRIS/PROBA data over land and inland waters. Proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21 – 23 March, ESRIN, Frascati, Italy, (ESA SP-593, June 2005).
- Harris, A., Bryant, R.G. & Baird, A.J. (2005). Detecting near-surface moisture stress in *Sphagnum spp.* *Remote Sensing of Environment* 97. S. 371 – 381.
- Hope, A.S., Fleming, J.B., Stow, D.A. & Aguado, E. (1991). Tussocks tundra Albedos on the north slope of Alaska: Effects of illumination, vegetation composition and dust deposition. *Journal of Applied Meteorology* 30. S. 1200 – 1206.
- Hope, A.S., Kimball, J.S. & Stow, D.A. (1993). The relationship between tussock tundra spectral reflectance properties and biomass and vegetation composition. *International Journal Remote Sensing* 14. S. 1861 – 1874.
- Horler, D.N.H., Dockray, M. & Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal Remote Sensing* 4. S. 273 – 288.
- Jet Propulsion Laboratory (1999). ASTER Spectral library. California Institute of Technology, Pasadena, California. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
- Karte, J. (1979). Räumliche Abgrenzung und regionale Differenzierung des Periglaziärs. *Bochumer Geographische Arbeiten* 35, Paderborn. 211 S.
- Kienast, F. & Tsherkasova, J. (2001). Comparative botanical recent-studies in the Lena Delta. In: Rachold, V. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2000. Reports on Polar and Marine Research 388. S. 24 – 47.

- Köppen, W. (1931). Grundriss der Klimakunde. De Gruyter Verlag, Berlin, 2. Auflage. 388 S.
- Krbetschek, M.R., Gonser, G. & Schwamborn, G. (2000). Luminescence dating results of sediment sequences of the Lena Delta. *Polarforschung* 70. S. 83 – 88.
- Kunitzky, V.V. & Schirrmeister, L. (2001). Geological and geomorphological situation of the Olenyok-Channel area. In: Rachold, V. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2000. Reports on Polar and Marine Research 388. S. 86 – 88.
- Kutzbach, L. (2000). Die Bedeutung der Vegetation und bodeneigener Parameter für die Methanflüsse in Permafrostböden. Diplomarbeit, Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg. 105 S.
- Kutzbach, L. & Kurchatova, A. (2002). Methane-related investigations of soils and waters in the Sanga-Dzhie region. In: Pfeiffer, E.M. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2001. S. 76 – 93.
- Kutzbach, L. (2005). The exchange of energy, water and carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River Delta, Northern Siberia. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. 148 S.
- Lachenbruch, A.H. (1966). Contraction theory of ice-wedge polygons: A qualitative discussion. Proceedings of 1<sup>st</sup> International Permafrost Conference, Washington. S. 63 – 71.
- Lozinski, W. von (1912). Die periglaziale Fazies der mechanischen Verwitterung. *Comptes Rendus. XI Congres Internationale Geologie, Stockholm 1910*. S. 1039 – 1053.
- Mackay, J.R. (1980). Deformation of ice-wedge polygons, Garry Island, Northwest Territories. In: Current Research, Part A, Geological Survey of Canada, Paper 80-1A. S. 287 – 291.
- MacDonald, J.A., Fowler, D., Hargreaves, K.J., Skiba, U., Leith, I.D. & Murray, M.B. (1998). Methane emission rates from a northern wetland, response to temperature, water table and transport. *Atmospheric Environment* 32. S. 3219 – 3227.
- Meyer, H. (2003). Late Quaternary climate history of Northern Siberia – evidence from ground ice. Reports on Polar and Marine Research 461. 111 S.
- Milton, E.J. (1987). Principles of field spectroscopy - Review article. *International Journal Remote Sensing* 8. S. 1807 – 1827.
- Milton, E.J., Rollin, E.M. & Emery, D.R. (1995). Advances in field spectroscopy. In: Danson, F.M. & Plummer, S.E. (Hrsg.). Advances in environmental remote

- sensing. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. S. 9 – 32.
- Morgenstern, A. (2005). GIS-basierte Analyse der Morphometrie und räumlichen Verteilung von Seen im Lena-Delta, NO-Sibirien. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Potsdam. 71 S.
- Morrisey, L.A. & Livingston, G.P. (1992). Methane emissions from Alaska arctic tundra: An assessment of local spatial variability. *Journal of Geophysical Research* 97 (D15). S. 16661 – 16670.
- Müller, K. (1997). Oberflächenstrukturen und Eigenschaften von Permafrostböden im nordsibirischen Lena-Delta. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160. S. 497 – 503.
- Munsell, K. (1975). Soil color chart. Kollmogen Corporation, Baltimore.
- Naumov, Ye.M. (2004). Soils and soil cover of Northeastern Eurasia. In: Kimble, J.M. (Hrsg.). *Cryosols - Permafrost-affected soils*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. S. 161 – 183.
- Pavlova, E.Yu. & Dorozhkina, M.V. (2001). History of the relief formation of the western Lena Delta Sector in the late Pleistocene-Holocene. In: Rachold, V. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). *Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2000*. Reports on Polar and Marine Research 388. S. 65 – 84.
- Petzold, D.E. & Rencz, A.N. (1975). The Albedo of selected subarctic surfaces. *Arctic and Alpine Research* 7. S. 393 – 398.
- Pfeiffer, E.-M., Wagner, D., Kobale, S., Kutzbach, L., Kurchatova, A., Stoof, G. & Wille, C. (2002). Modern processes in permafrost affected soils. In: Pfeiffer, E.-M. & Grigoriev, M.N. (Hrsg.). *Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA 2000 - The Expedition LENA 2001*. S. 21 – 41.
- Pinar, A. & Curran, P.J. (1996). Grass chlorophyll and the reflectance red edge, Technical note. *International Journal Remote Sensing* 17 (2). S. 351 – 357.
- Pu, R., Ge, S., Kelly, N.M. & Gong, P. (2003). Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal Remote Sensing* 24. S. 1799 – 1810.
- Rachold, V. & Grigoriev, M.N. (2003). Introduction, In: Grigoriev, M.N., Rachold, V., Bolshiyarov, D.Yu., Pfeiffer, E.-M., Schirmer, L., Wagner, D. & Hubberten, H.-W. (Hrsg.). *Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA - The Expedition Lena 2002*. Reports on Polar and Marine Research 466. S 1 – 2.
- Rees, W.G., Williams, M. & Vitebsky, P. (2003). Mapping land cover change in a reindeer herding area of the Russian Arctic using Landsat TM and ETM+ imagery and indigenous knowledge. *Remote Sensing of Environment* 85. S. 441 - 452.

- Rees, W.G., Tutubalina, O.V. & Golubeva, E.I. (2004). Reflectance spectra of subarctic lichens between 400 and 2400 nm. *Remote Sensing of Environment* 90. S. 281-292.
- Richards, J.A. & Jia, X. (1999). *Remote sensing digital image analysis - An introduction*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Auflage. 363 S.
- Ritchie, J.C., Schmugge, T.J. & Hsu, A. (2006). Comparison of ASTER, MASTER, Landsat, and ground-based reflectance measurements. *Geophysical Research Abstracts* 8. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-10460.
- Rock, B.N., Hoshizaki, T. & Miller, J.R. (1988). Comparison of *In Situ* and airborne spectral measurements of the Blue Shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment* 24. S. 109 – 127.
- Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W., Gavrillov, A.V., Tumskoy, V.E., Tipenko, G.S., Grigoriev, M.N. & Siegert, Ch. (2000). Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea Region, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes* 11. S. 137 – 152.
- Salisbury, J.W. (1998). *Spectral measurements field guide*. Defense Technology Information Center Report Nr. ADA362372, Earth Satellite Corporation. 76 S.
- Schachtschabel, P., Blume, H.P., Brümmer, G., Hartge, K.H. & Schwertmann, U. (1992). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 13. Auflage. 491 S.
- Schirrmeyer, L., Kunitsky, V.V., Grosse, G., Schwamborn, G., Andreev, A.A., Meyer, H., Kuznetsova, T., Bobrov, A., & Oezen, D. (2003). Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A multidisciplinary approach. *Polar Geography* 27. S. 277 – 319.
- Schmidt, K.S. & Skidmore, A.K. (2003). Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment* 85. S. 92 – 108.
- Schneider, J (2005). *Bilanzierung von Methanemissionen in Tundragebieten am Beispiel des Lena-Deltas, Nordostsibirien, auf der Basis von Fernerkundungsdaten und Geländeuntersuchungen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden. 115 S.
- Schultz, J. (2002). *Die Ökozonen der Erde*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 3. Auflage. 320 S.
- Schwamborn, G., Andreev, A.A., Rachold, V., Hubberten, H.-W., Grigoriev, M.N., Tumskoy, V., Pavlova, E.Yu. & Dorozhkina, M.V. (2000). Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, Western Lena River Delta, during Late Pleistocene and Holocene time. *Polarforschung* 70. S. 69 – 82.
- Schwamborn, G., Rachold, V. & Grigoriev, M.N. (2002). Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *Quaternary International* 89. S. 119 – 134.

- Scott Smith (?), C.A. & Goryachkin, S. (2004). The geography of cryosols – Introduction. In: Kimble, J.M. (Hrsg.). Cryosols - Permafrost-affected soils. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. S. 47 – 48.
- Semmel, A. (1993). Grundzüge der Bodengeographie. Teubner Studienbücher der Geographie, Stuttgart, 3. Auflage. 127 S.
- Smith, L.C., MacDonald, G.M., Velichko, A.A., Beilman, D.W., Borisova, O.K., Frey, K.E., Kremenetski, K.V. & Sheng, Y. (2004). Siberian peatlands an net Carbon sink and global Methan source since the Early Holocene. *Science* 303. S. 353 – 356.
- Soil Survey Staff (2003). Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 9. Auflage. 332 S.
- Soloviev, P.A. (1973). Thermokarst phenomena and landforms due to frostheaving in Central Yakutia. *Biuletyn Peryglacjalny* 23. S. 135 – 155.
- Söllner, R. (2000). Fernerkundungsdaten. In: Barsch, H., Billwitz, K. & Bork, H.R. (Hrsg.). *Arbeitsmethoden in Physiogeographie und Geoökologie*. Justus Perthes Verlag, Gotha. S. 102 – 142.
- Stow, D.A., Burns, B.H. & Hope, A.S. (1993). Spectral, spatial and temporal characteristics of Arctic tundra reflectance. *International Journal Remote Sensing* 14 . S. 2445 – 2462.
- Stow, D.A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., Houston, S., Racine, C., Sturm, M., Tape, K., Hinzman, L., Yoshikawa, K., Tweedie, C., Noyle, B., Silapaswan, C., Douglas, D., Griffith, B., Jia, G., Epstein, H., Walker, D., Daeschner, S., Petersen, A., Zhou, L. & Myneni, R. (2004). Remote sensing of vegetation and land-cover in arctic tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 89. S. 281 – 308.
- US Army Corps of Engineers (2003). Remote Sensing. In: *Engineering and Design, Engineer Manual 1110-2-2907*. <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2907/toc.html>.
- van der Meer, F. (2004). Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5. S. 55 – 68.
- van Til, M., Bijmer, A. & de Lange, R. (2004). Seasonal variability in spectral reflectance of coastal dune vegetation. *EARSeL eProceedings* 3. S. 154 – 165.
- Wagner, D., Kobabe, S., Pfeiffer, E.M. & Hubberten, H.W. (2003). Microbial controls on methan fluxes from polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes* 14. S. 173 – 185.
- Walker, H.J. (1998). Arctic Deltas. *Journal of Coastal Research* 14. S. 718 - 738.

- Washburn, A.L. (1979). *Geocryology - A survey of periglacial processes and environments*. E. Arnold Ltd., London, 2. Auflage. 406 S.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z. & Bing, Z. (2002). Relating soil moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment* 81. S. 238 – 246.
- Wein, N. (1999). *Sibirien*. Klett-Perthes, Gotha, Stuttgart. 248 S.
- Weise, O.R. (1983). *Das Periglazial - Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen*. Gebr. Bornträger Verlag, Berlin, Stuttgart. 199 S.
- WWIS (2006). World Weather Information Service. <http://www.worldweather.org/107/c01040.html>.
- Yershov, E.D. (1998). *General Geocryology*. Studies in Polar Research. Cambridge University Press, Cambridge. 580 S.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom & J.A., Brown, J. (1999). Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography* 23. S. 132 - 154.
- Zhang, T., Roger, G.B. & Armstrong, R.L. (2004). Application of satellite remote sensing techniques to frozen ground studies. *Polar Geography* 28. S. 163 - 196.



Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
---	---------------------------------	------------------	-------	---	----------------------------

<b>Insel Samoylov (Sam1) / 12.08.2005 / 11:40</b> 126° 28' 40.66" E 72° 22' 1.56" N	<i>low-centre</i> Polygon auf oberster Akkumulationsterrasse / Wetter: wechselnd bis stark bewölkt	000 / 001	bareoptic / 24°	Polygonwall oben, Gräser und Moose	Punktmessung
		002 / 003	bareoptic / 24°	Polygonwall Mitte (Hang), Moose und <i>Salix sp.</i>	Punktmessung
		004 / 005	bareoptic / 24°	Polygonzentrum, feucht, Moose, Seggen	Punktmessung
		006 / 007 / 008	bareoptic / 24°	Polygonzentrum, Sediment mit Vegetation in geringer Bedeckung, Moose, Seggen, <i>Salix sp.</i>	Punktmessung / sonniger
		009 / 010	bareoptic / 24°	Polygonzentrum, Sediment mit Vegetation in geringer Bedeckung, weniger Moos	Punktmessung
		011 / 012	bareoptic / 24°	Polygonhang mit Moosen und Gräsern	Punktmessung
		013 / 014 / 015	bareoptic / 24°	Polygonwall über Frostcrack	Punktmessung / starker Wolkenwechsel
		016 - 020	bareoptic / 24°	Profil über Polygon etwa von N nach S	Profilmessung
		021 - 025	bareoptic / 24°	Profil über Polygon etwa von S nach N	Profilmessung
		026 - 029	bareoptic / 24°	Profil über Polygon etwa von O nach W	Profilmessung
		030 - 033	bareoptic / 24°	Profil über Polygon etwa von W nach O	Profilmessung
		034 / 035	8 Grad	<i>Salix sp.</i> -Busch, etwa 15cm hoch, graugrüne Blätter und mit vereinzelt Gräsern	Punktmessung
		036 / 037	8 Grad	Bereich mit Moos (grün-gelblich) und vereinzelt Gräsern	Punktmessung
		038 / 039	8 Grad	Sedimentfleck mit vereinzelt Gräsern und <i>Polygonum sp.</i>	Punktmessung
		040 / 041	8 Grad	Bereich mit Gräsern, vereinzelt Moos	Punktmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Samoylov (Sam2) / 12.08.2005 / 16:30 / 126° 28' 43.43" E 72° 22' 8.18" N</b>	Polygon mit Tümpel und Profil über Hang zum Saunasee auf oberen Akkumulationsniveau	000 / 001	bareoptic / 24°	Polygonwall oben, Gräser, Moose, vereinzelt <i>Salix sp.</i>	Punktmessung
		002 / 003	bareoptic / 24°	Polygonhang, Untergrund feuchter, mehr Moose, weniger Gräser	Punktmessung
		004 / 005	bareoptic / 24°	Polygonzentrum bewachsen, Untergrund sehr feucht, Seggen, weniger Moos	Punktmessung
		006 / 007	bareoptic / 24°	Polygonzentrum, stehendes Wasser, nur Seggen	Punktmessung
		008 / 009	bareoptic / 24°	Polygontümpel, ca.70cm tief, nicht bewachsen	Punktmessung
		010	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		011 - 012	bareoptic / 24°	Profil vom Polygonwall zum Polygonzentrum, etwa 3-4m	Profilmessung
		013 - 015	bareoptic / 24°	Profil vom Polygonzentrum zum Polygonwall	Profilmessung
		016	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		017 - 040	bareoptic / 24°	Profil von oberer Terrasse (Untergrund relativ feucht) über trockeneren Hang (2-3°) in Richtung Saunasee, Startpunkt: 126° 28' 41.99" E 72° 22' 8.61" N, Endpunkt: 126° 28' 45.63" E 72° 22' 7.10" N 017 - 020 etwa 20m über ein Polygon in das nächste Polygonzentrum 021 Fehler 022 Weißreferenz zirka ab 035 / 036 trockenerer Hangbereich	Profilmessung
<b>Insel Samoylov (Sam3) / 12.08.2005 / 18:15</b>	Profil von niedriger, älterer Terrasse zu höher gelegener Terrasse, Wetter: diffus sonnig / Startpunkt: 126° 28' 29.03" E 72° 22' 12.54" N, Endpunkt: 126° 28' 31.08" E 72° 22' 9.08" N	000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		001 - 028	bareoptic / 24°	003 / 004 / 005 moosig, feucht 008 Polygonwall, trocken 010 / 011 moosig, stehendes Wasser 017 Polygonwall, moosig 021 / 022 Übergang von unteren Niveau zum Höheren über kurzen, steilen Hang, relativ trocken 028 Polygonwall auf oberer Terrasse	Profilmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Samoylov (Sam4) / 12.08.2005 / ca.19:00</b>	Profil auf niederer (episodischer) Überflutungsterrasse, Startpunkt: 126° 28' 23.34" E 72° 22' 13.47" N, Endpunkt: 126° 28' 18.95" E 72° 22' 13.87" N			Vegetation, spärlich bewachsen, Bedeckungsgrad etwa 50%, Seggen und <i>Salix sp.</i> , dazwischen freiliegender dunkelgrauer Boden	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		001 - 012	bareoptic / 24°	001 - 004 relativ trocken  ab 005 etwa 5 cm hohes stehendes Wasser mit bis zu 40cm hohen Seggen	Profilmessung
<b>Insel Kurungnahk (Bkh05) / 13.08.2005 / ca. 18:00, 126° 15' 22.57" E 72° 19' 15.88" N</b>	<b>Bkh05c</b> Profil und Punktmessungen im ausgelaufenen Alassees der 3. Terrasse, Wetter: wechselnd bewölkt mit sonnigen Abschnitten			Vegetation: relativ hohe Graeser und <i>Salix sp.</i> -Büsche	
		000 / 001	bareoptic / 24°	Sediment	Punktmessung
		002 / 003	bareoptic / 24°	Gras	Punktmessung
		004 / 005	bareoptic / 24°	Gras	Punktmessung
		006 / 007	bareoptic / 24°	<i>Salix sp.</i> -Busch 60-70cm hoch, darunter Gras	Punktmessung
		008	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		009 - 013	bareoptic / 24°	Profil über Thermokarsthügel mit Gräsern und <i>Salix sp.</i>	Profilmessung
		014 / 015	bareoptic / 24°	Gras trocken	Punktmessung
		016 / 017	bareoptic / 24°	Sedimentpatch	Punktmessung
	018 - 024	bareoptic / 24°	Profil zwischen Thermokarsthügeln mit mehr Gräsern	Profilmessung	
	<b>Bkh05d</b> Oberfläche der 3.Terrasse	026 - 042	bareoptic / 24°	Profil über die Oberfläche der 3.Terrasse mit verschiedenen Vegetationseinheiten, <i>Salix sp.</i> , Moosflecken, Grasflecken, Startpunkt: 126° 15' 35.53" E 72° 19' 14.95" N, Endpunkt: 126° 15' 40.03" E 72° 19' 14.91" N	Profilmessung
		043 / 044	bareoptic / 24°	<i>Salix sp.</i> , 3.Terrasse	Punktmessung
		045 / 046	bareoptic / 24°	Moosfleck, grün, 3.Terrasse	Punktmessung
047 / 048		bareoptic / 24°	Grasfleck, 3.Terrasse	Punktmessung	

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Ebe-Basy-Sise</b> / T008 / 18.08.2005 / ca. 10:30 / 123° 48' 18.90" E 72° 57' 51.40" N	Sandfläche, ca. 8m über dem Kanal (Campside), Wetter: schwach windig, diffus (verschleiert) sonnig			Bodenverhältnisse: sandig, trocken, ebenes Relief, Vegetation: spärlich bewachsen (etwa 60% Bedeckung) Moose, Flechten, vereinzelt Gräser bis 20cm hoch und Kräuter, Vegetation im Durchschnitt flach, etwa 5 cm hoch	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	sandiger Boden, trockenes Gras, <i>Cassiope tetragona</i> , 60% Bedeckung	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	kleiner Wall, trocken, vor allem Moose (grün), diverse Flechten (Rentierflechte), <i>Dryas sp.</i> , relativ dicht bewachsen	Punktmessung
		005 / 006	bareoptic / 24°	sandig, Bedeckung ca.80%, Moos (grün), Kräuter, Höhe 3-4cm	Punktmessung
		007 / 008	bareoptic / 24°	Referenzfläche (ca 1x1m), sandig, trocken, Bedeckg. 50%, kaum Moos, <i>Dryas sp.</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Cassiope tetragona</i> , <i>Vaccinium sp.</i> , vereinzelt Grashalme, Vegetationshöhe etwa 2cm, 123° 48' 18.14" E 72° 57' 52.66" N	Punktmessung
		009 / 010	bareoptic / 24°	Sand mit Windrippeln, Farbe: hell-gelblich, Fein-Mittelsand, fluvial akkumuliert, äolisch ueberarbeitet, vegetationslos	Punktmessung
		011 - 020	bareoptic / 24°	Profil ca.50m von W - O über Sandfläche, Vegetation trocken, ähnlich Referenzfläche, spaerlich bewachsen, wenig Moos, vereinzelt trockene Wollgräser,	Profilmessung
		021 - 028	bareoptic / 24°	Profil von O - W über die gleiche Oberfläche	Profilmessung
<b>Insel Ebe-Basyn-Sise</b> / T009 / 18.08.2005 / ca. 11:30 / 123° 48' 26.39" E 72° 57' 46.64" N	höhere Aue (episodischer Überflutungsbereich) südöstlich unterhalb des Camp, etwa 1 -2 m über Kanal, Wetter: sonnig, vereinzelt Schleierwolken			Ebenes Relief, Vegetation 30-40cm hoch, Seggen und <i>Salix sp.</i> auf Moosen, als Tussocks verbreitet, dazwischen stehendes, braunes Wasser, AL gemessen in den Tussocks etwa 40cm, dazwischen ca. 30cm	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	
		001 / 002	bareoptic / 24°	Grastussock ( <i>Cyperaceae</i> ) auf Moos etwa 30cm hoch	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	vor allem <i>Salix sp.</i> auf Moospolster und stehendes Wasser	Punktmessung
		005 / 006	bareoptic / 24°	Grastussock ( <i>Cyperaceae</i> ) etwas grüner und flacher	Punktmessung
		007 / 008	bareoptic / 24°	stehendes Wasser, etwa 5cm tief, braun	Punktmessung
		009 - 019	bareoptic / 24°	Profil etwa von NW nach SO etwa 60m, Messzyklus etwa alle 4m, Startpunkt s.o., Endpunkt: 123° 48' 27.25" E 72° 57' 45.60" N	Profilmessung
		020 - 028	bareoptic / 24°	Profil von S nach N über die gleiche Oberfläche	Profilmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T010 /</b> 18.08.2005 / ca.12:15 / 123° 48' 14.54" E 72° 57' 56.26" N	Polygontundra, etwa 1 - 2 m niedrigeres Geländeniveau in westlicher Richtung direkt an der Campside, Wetter: sonnig, klar			Relief zum See hin leicht abfallend, orthogonale <i>low-centre</i> Polygonstruktur, durchschnittlich 12 - 18m im Durchmesser, Zentren mit stehendem Wasser, Wälle trockener, im Durchschnitt 50cm hoch, Vegetation auf den Polygonwällen: Moose, Seggen, Gräser, <i>Betula sp.</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Dryas sp.</i> , diverse Flechten, einige Kräuter, AL zwischen 30 und 40cm, Polygonzentren: stehendes Wasser, etwa 10cm tief, Vegetation Tussock ähnlich mit <i>Sphagnum sp.</i> und Seggen (etwa 30cm hoch), vereinzelt Wollgras, AL im Durchschnitt 45cm	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	Polygonwall	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	Moosfleck ( <i>Sphagnum sp.</i> ) grün, feucht	Punktmessung
		005 / 006	bareoptic / 24°	Polygonzentrum, stehendes Wasser über Moosen, Seggen in kleineren Büscheln	Punktmessung
		007 / 008	bareoptic / 24°	Wollgras, relativ dicht bewachsen, im stehenden Wasser	Punktmessung
		009 / 010	bareoptic / 24°	Eisenausfällung am Rande eines Tümpel, feuchter bis nasser Boden	Punktmessung
		011 / 012	bareoptic / 24°	Tümpel mit Unterwasser stehenden Gräsern	Punktmessung
		013 - 024	bareoptic / 24°	Profil über mehrere Polygone etwa von NO nach SW	Profilmessung
		025 - 034	bareoptic / 24°	Profil etwa von SW nach NO über die gleiche Oberfläche	Profilmessung
<b>Ebe-Basyn-Sise / T011a / 18.08.2005 /</b> ca. 14:00 / 123° 47' 29.47" E 72° 58' 9.25" N	Aue vor dem Alas auf Ebe-Basyn-Sise, Wetter: sonnig, klar			Relief: leicht vom Alas zum Kanal hin abfallend, Boden relativ feucht, teils stehendes Wasser, Schwemmhölzer, Vegetation überwiegend <i>Salix sp.</i> und Seggen auf Moospolster, vereinzelt Wollgrasflächen	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	Süßgräser und Seggen auf Moospolster, etwa 20cm hoch, vereinzelt Schachtelhalme	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	<i>Salix sp.</i> -Busch etwa 30cm hoch, darunter Gräser und Moose	Punktmessung
		005 / 006	bareoptic / 24°	Treibholz etwa 2m lang, 30 cm im Durchmesser, trocken, ausgebleicht	Punktmessung
		007 - 020	bareoptic / 24°	Profil über Aue	Profilmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Ebe-Basy-Sise / T011b / 18.08.2005 /</b> 123° 47' 3.84" E 72° 58' 13.86" N	Aue, Standort etwa 200m nördlich von T011a, 20m von der Kanal-Uferlinie entfernt	Rötliches Gras ( <i>Arctophylla sp</i> ) dominiert die Bedeckung, etwa 30 - 50cm hoch, dazwischen vereinzelt trockene Wollgräser, Vegetation vom Wind etwas umgelegt, Bedeckungsgrad 80 - 90%, sehr feuchter Boden zwischen der Vegetation, teilweise 2 - 3cm stehendes Wasser, AL zwischen 70 und 80 cm			Punktmessung
		021 / 022	bareoptic / 24°		
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T012 18.08.2005 /</b> 123° 46' 41.09" E 72° 58' 6.26" N	Alassenke, Standort etwa 150 von langgestreckten See in Richtung Kanal	Relief, relativ ebenes Gelände, undeutliche <i>low-centre</i> Polygonstruktur, Boden relativ feucht, mässig drainiert, Vegetation, Moose und Seggen, vereinzelt Wollgräser, an trockeneren Stellen mehr <i>Salix sp.</i> , Wuchshöhe 20- 30cm, vereinzelt Treibholzstämme, AL: auf den Wällen etwa 30 cm, an feuchten Stellen 35-40 cm			
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	feuchte Senke (Polygonzentrum?), Moose und Seggen 20-30 cm hoch	Punktmessung
		003/004	bareoptic / 24°	Wall, Boden trocken, besser drainiert, <i>Salix sp.</i> , trockenere Moose, Seggen und Gräser	Punktmessung
		005 - 015	bareoptic / 24°	Profil über feuchte Polygonzentren und trockenere Polygonwälle, etwa von NW nach SO	Profilmessung
<b>Insel Turakh-Sise / T019 / 25.08.2005 / 13:15</b> 123° 50' 6.31" E 72° 58' 53.89" N	Alassenke, Standort am südlichen See, südliches Seeufer, Wetter: wechselnd bewölkt, viele Cirruswolken, Messung beschränkt auf Wolkenlöcher	Vegetation, mehr oder weniger einheitlich <i>Salix sp.</i> zwischen teils trockenen Gräsern auf Moospolster, vereinzelt Wollgräser, Vegetationsbedeckung nahe 100%, Wuchshöhe etwa 30cm, AL im Mittel 30cm			
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	<i>Salix sp.</i> zwischen Gräsern auf Moospolster, Vegetation relativ trocken	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	etwa 2 cm stehendes, braunes Wasser mit Gräsern (grüner), Wuchshöhe etwa 30 cm	Punktmessung
		005 / 006	bareoptic / 24°	mehr <i>Salix sp.</i> zwischen eher trockeneren Gräsern	Punktmessung, aufkommende Bewölkung bei 006
		007 / 008	bareoptic / 24°	(Fehler)	Punktmessung, bewölkt
		009 - 019	bareoptic / 24°	Profil am Seeufer, 014 und 017 - 019 vor allem stehendes Wasser	Profilmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise/ T048 /</b> 31.08.2005 / 11:40 / 123° 45' 19.56" E 72° 58' 35.17" N	Sandkliff am Kanal, Standort westliche Ecke am Ausgang der Alassenke, Wetter: sonnig, klar, vereinzelte Cirruswolken, leicht windig, etwa 10°C			Vegetation, sehr spärlich bewachsen, etwa 20% Bedeckung, herbstliche Zwergsträucher neben trockenen Gräsern und Moosen, Wuchshöhe max. 20 cm, AL etwa 1,05 m	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	Sand, trocken mit herbstlicher <i>Salix sp.</i>	Punktmessung
		003 - 007	bareoptic / 24°	Profil auf dem Kliff, etwa 25m in Richtung Ufer (Norden)	Profilmessung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T049 /</b> 31.08.2005 / 11:52 / 123° 45' 8.90" E 72° 58' 33.48" N	<b>T049a</b> Westlicher Wall des Alas, Oberhang	Hummock-Oberfläche			
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	Fläche zwischen Hummocks mit gelblichen Flechten neben Rentierflechte, <i>Cassiope tetragona</i> (trocken), vereinzelt <i>Dryas sp.</i>	Punktmessung
		003/004	bareoptic / 24°	Hummock mit <i>Dryas sp.</i> , <i>Cassiope tetragona</i> , Rentierflechte, trockene Moose, Grustenflechten sowie diverse <i>Ericaceae</i>	Punktmessung
		005 - 020	bareoptic / 24°	Profil über Alaswall (Oberhang), Startpunkt s.o. Endpunkt: 123° 45' 2.67" E 72° 58' 31.39" N	Profilmessung
	021 / 022	bareoptic / 24°	trockenes, gräuliches Moos und gelben Flechte	Punktmessung	
	<b>T049b</b>	023 - 049	bareoptic / 24°	Profil vom Übergangsbereich in die Tundra über den Alaswall in die Alassenke, Startpunkt: 123° 44' 58.32" E 72° 58' 34.09" N Endpunkt: 123° 45' 10.23" E 72° 58' 30.38" N	
		050 / 051	bareoptic / 24°	<i>Cassiope tetragona</i>	Punktmessung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T050 /</b> 31.08.2005 / 12:26 / 123° 45' 6.67" E 72° 58' 35.21" N	<i>low-centre</i> Polygonstruktur, Übergangsbereich vom Alaswall in Tundra, Wetter, (siehe T048)	Polygone etwa 10 - 12 m im Durchmesser, Polygonzentren etwa 6 m, auffällig hohe Polygonwälle, etwa 50 - 80 cm, Vegetation, Polygonzentren 10 cm stehendes Wasser mit vor allem Seggen (30 - 40 cm Wuchshöhe), teils vertrocknet, etwa 60% Bedeckung, Wälle trocken, ähnlich Alaswall mit Flechten, Moosen, weniger Gräsern			
		000 / 001	bareoptic / 24°	Polygonzentrum	Punktmessung
		002 / 003	bareoptic / 24°	Polygonwall	Punktmessung
		004 - 022	bareoptic / 24°	Profil über mehrere Polygone, Startpunkt s.o., Endpunkt 123° 44' 55.37" E 72° 58' 34.81" N	Profilmessung



		023 / 024	bareoptic / 24°	Wasser, kleiner Tümpel, hier etwa 50cm tief, mit dünner Eisbedeckung	Punktmessung
		025/026	bareoptic / 24°	am Tümpel, Moosfleck ( <i>Sphagnum sp.</i> , grün-gelblich, sehr feucht) und Gräser	Punktmessung
		027/028	bareoptic / 24°	am Tümpel, Moosfleck ( <i>Sphagnum sp.</i> , grün-gelblich, sehr feucht) mit vereinzelt Grashalmen	Punktmessung
	Alassenke, verschiedene Oberflächenstrukturen, gleichbleibende Wetterbedingungen	Oberflächenbedingungen sehr feucht, mit stehenden Wasser, undeutliche Polygonstruktur, langedogene, parallel zum Alaswall und Seeufer verlaufende Wälle, ohne deutliche Querverbindungen und dazwischen Senkenbereiche, ähnlich Polygonzentren, sehr feucht, schlecht drainiert			
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
<b>Insel Ebe-Basyn-Sise / T051 / 31.08.2005 / 13:28 / 123° 45' 0.55" E 72° 58' 28.04" N</b>	<b>T051a</b>	001 / 002	bareoptic / 24°	am westlichen Hangfuss des Alaswall, charakteristisch für eine etwa 20 m breite Zone, Seggen etwa 20 - 30cm hoch, teils trocken auf <i>Sphagnum sp.</i> -Polster im Verhältnis zirka 50/50	Punktmessung
		003 - 023	bareoptic / 24°	Profil über nordwestlichen Teil der Alassenke, in Richtung eines verlandenden/moorigen See, vom Hangfuss des Alaswall über Wechsel von langedogenen, parallel zum Hang verlaufenden (Polygon-)Wällen und Senken mit stehenden Wasser, Startpunkt s.o., Endpunkt 123° 45' 10.49" E 72° 58' 25.88" N	Profilmessung
		024 / 025	bareoptic / 24°	Fleck mit grün-gelblichen Moosen, vereinzelt Gräsern und Fingerflechte	Punktmessung
		026 / 027	bareoptic / 24°	Mikropingo im verlandenden, vermoorten See, mit vor allem trockenen Gräsern, darunter Moospolster, vereinzelt Wollgräser	Punktmessung
	<b>T051b</b>	028 / 029	bareoptic / 24°	verlandender, mooriger Teil eines Alassees mit grünlich erscheinenden <i>Arctophylla sp.</i> und Wollgräsern, Wasserstand etwa 5 - 10cm über Moospolster, Einsinktiefen im Moospolster min.30cm bis Permafrostoberfläche	Punktmessung
		030 / 031	bareoptic / 24°	ähnliche Oberflächenverhältnisse wie 028 / 029, allerdings mehr <i>Sphagnum sp.</i> an der Wasseroberfläche und auftretende rötlich erscheinende <i>Arctophylla sp.</i>	Punktmessung
		032 / 033	bareoptic / 24°	gleiche Oberflächenverhältnisse, rötliche <i>Arctophylla sp.</i> überwiegen und grüne <i>Sphagnum sp.</i> an der Wasseroberfläche	Punktmessung
		034 / 035	bareoptic / 24°	kleinere rötliche <i>Arctophylla sp.</i> und grün-bräunliche <i>Sphagnum sp.</i> unter der Wasseroberfläche	Punktmessung

Ort / Datum / Uhrzeit / Koordinaten	Standort / Wetterbedingungen	Aufnahme- Nr.	Optik	Charakteristik: Oberfläche / Vegetation	Messvorgang / Bemerkung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T052 / 31.08.2005 / 14:13 / 123° 45' 34.32" E 72° 58' 24.80" N</b>	Schwemmholzsaum, am nördlichen den Alas zum Kanal hin begrenzenden Kliff			Weißreferenz	
		001 - 010	bareoptic / 24°	Profil über Schwemmholzsaum, Startpunkt s.o., Endpunkt 123° 45' 38.42" E 72° 58' 23.22" N	Profilmessung
		011 / 012 / 013 / 014	bareoptic / 24°	Schwemmholzstämmen	Punktmessung
<b>Insel Ebe-Basyn- Sise / T053 / 31.08.2005 / 15:52 / 123° 48' 30.02" E 72° 57' 46.82" N</b>	höhere Aue (episodischer Überflutungsbereich), (siehe T009)			nochmalige Punktmessung und Profil in unteres Auenniveau, Vegetation siehe T009, allerdings jetzt herbstlich gefärbt und trockenere Gräser, Wuchshöhe 20 - 30 cm, ALzwischen 35 und 40 cm	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	herbstliche <i>Salix sp.</i> und trockene Gräser auf Moospolster	Punktmessung
		003 - 021	bareoptic / 24°	Profil über obere Aue zu niedrigerem Niveau, zirka 011 Übergang, kleines, flaches Kliff etwa 1,50 m, Startpunkt s.o. Endpunkt 123° 48' 41.76" E 72° 57' 44.45" N	Profilmessung
		022 / 023	bareoptic / 24°	unterstes Auenniveau, 30-40 cm hohe, herbstliche <i>Salix sp.</i> -Büsche, darunter teils trockene Gräser etwa 20 cm hoch, Active Layer durchschnittlich 70cm	Punktmessung
		024 / 025	bareoptic / 24°	Grasfleck etwa 2 m im Durchmesser, ohne <i>Salix sp.</i> , Gräser etwa 10 cm hoch, trocken	Punktmessung
		026	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		027 / 028	bareoptic / 24°	Referenzfläche (siehe T008), Vegetation herbstlicher, Oberfläche verspült durch häufige Niederschläge	Punktmessung
<b>Insel Turakh-Sise / T054 / 31.08.2005 17:41 / 123° 48' 33.04" E 72° 58' 29.95" N</b>	auf Gleithang eines mäandrierenden Bachtälchen, Tälchen führt vom Kanal zum 1. Alassee			Vegetation, vor allem Gräser und Seggen bis 40 cm (Wuchshöhe) auf trockenem Moospolster, kleinere Flächen mit herbstlicher <i>Salix sp.</i> , Bodenverhältnisse wechseln vom Bach zum Hang von feucht bis relativ trocken	
		000	bareoptic / 24°	Weißreferenz	Punktmessung
		001 / 002	bareoptic / 24°	grüne Gräser und Seggen, etwa 10-15 cm hoch, mit trockeneren Stellen, etwa 3 m vom Bachufer, Active Layer zwischen 25 und 40 cm	Punktmessung
		003 / 004	bareoptic / 24°	Bachufer, rötliche <i>Arctophylla sp.</i> liegen dicht auf der Wasseroberfläche	Punktmessung

005 / 006	bareoptic / 24°	<i>Arctophylla</i> sp. weniger dicht im und unter Wasser	Punktmessung
007 / 008	bareoptic / 24°	Bach, fließendes Wasser, etwa 25cm tief, brauner Gewässerboden	Punktmessung
009 - 019	bareoptic / 24°	Profil über Gleithang zum Talhang über verschiedene Oberflächenverhältnisse, Startpunkt s.o., Endpunkt 123° 48' 37.65" E 72° 58' 31.64" N	Profilmessung
020 / 021	bareoptic / 24°	Polygontundra am Oberhang des Talhanges, Übergang in die Alassenke, gemessen nur Polygonzentrum	Punktmessung

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
<b>Samoylov 1.Terrasse</b>				
Sam1	126° 28' 40.66" E 72° 22' 1.56" N	12.08. 10:40	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung, Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	oberste Akkumulationsterrasse der Insel, sandiger Untergrund, hexagonale <i>low-centre</i> Polygone, feucht, ohne stehendes Wasser, Wall ca.50cm hoch mit juvenilen Eiskeilen unter Frostrissen, Vegetation: <i>Salix sp.</i> , Moose, <i>Carex sp.</i> , <i>Dryas sp.</i> , <i>Pedicularis sp.</i> , Bodentyp (auf Wall): Glacis Psammoturbel, alluviale Feinsande
Sam2	126° 28' 43.43" E 72° 22' 8.18" N	12.08. 16:30	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	oberes Akkumulationsniveau, Hangneigung 2-3°, <i>low-centre</i> Polygonstruktur, feucht, teilweise mit Tümpeln, ca. 8m im Durchmesser, Vegetation: vor allem Gräser und Seggen an nassen Stellen, reichlich Moos, vereinzelt <i>Salix sp.</i>
Sam3	126° 28' 37.24" E 72° 22' 10.38" N	12.08. 18:15	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	durch flaches Kliff gekennzeichneter Übergangsbereich von höherem Terrassenniveau auf niedrigeres Niveau (alte Flussaue mit Schwemmhölzern, nicht mehr überflutete), Untergrund Hangbereich relativ trocken, auf Terrassen teilweise stehendes Wasser, undeutliche Polygonstruktur auf niedrigeren Niveau, Vegetation: Gräser, vereinzelt <i>Salix sp.</i> auf dichtem Moospolster, wenn Untergrund trockener tritt <i>Salix sp.</i> mehr hervor, AL auf leicht geneigten Hang und Übergangsbereich: 40cm Wall, 43cm Frostriss/Hangfuss, 35cm Wall/Hang, 36cm Frostriss/Hang, 26cm Wall/Hangfuss, 30cm Frostriss/Hangfuss, 37cm Zentren mit steh.Wasser/Hangfuss, 31cm Zentren, Auftauzone (AL) auf alter Flussaue: 56 - 65cm an 6 Stellen
Sam4	126° 28' 27.09" E 72° 22' 13.22" N	12.08. 19:00	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung, Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	episodische Überflutungsterrasse, spärlicher Bewuchs, vor allem <i>Salix sp.</i> und Seggen sowie <i>Polygonum sp.</i> , AL: 45 - 55cm an 10 Stellen, Bodentyp: Psammentic Aquorthel, fluviale Sande
<b>Ebe-Basyn-Sise 2.Terrasse</b>				
T001	123° 46' 58.44" E 72° 58' 10.66" N	17.08. 12:43	Oberflächenbeschreibung	Flussaue ca. 1 - 4m über Flussniveau, flach geneigt 3 - 4°, Vegetation: Wuchshöhe ca. 20cm, überwiegend <i>Salix sp.</i> und Seggen, vereinzelt Kräuter, begrenzt durch Schwemmhölzsaum, orthogonale, wahrscheinlich junge Polygone mit grossen Durchmessern, kaum Senken/Wall-Relief, keine Tümpel aber vereinzelt stehendes Wasser, Oberfläche im Allgemeinen relativ gut bis mässig drainiert, Al ca. 50cm
T002	123° 46' 26.30" E 72° 58' 16.09" N	17.08. 13:03	Oberflächenbeschreibung	Flussaue, sehr flach geneigt 1 - 2°, Vegetation: 70 - 80% Bedeckung, weniger <i>Salix sp.</i> neben Seggen und Wollgräsern, Wuchshöhe ca. 15cm, Oberfläche mässig bis schlecht draniert, ohne Polygonstruktur, keine Tümpel, verbreitet kleine vegetationsfreie Sedimentflächen
T003	123° 45' 55.66" E 72° 58' 17.14" N	17.08. 13:19	Oberflächenbeschreibung	Alassenke nahe Kliff zur Aue, vereinzelte Schwemmhölzer, ebenes Relief ohne Tümpel, sehr grosse <i>low-centre</i> Polygone, ca. 25m im Durchmesser, Wallbreite 3,5m, Wallhöhe 0,3m, Zentren schlecht drainiert, Wälle trockener, besser drainiert, Vegetation: in Zentren 90 - 95% Bedeckung, Seggen und <i>Salix sp.</i> , Wälle mit 100% Bedeckung, Moose, Flechten und Seggen
T004	123° 45' 14.30" E 72° 58' 37.11" N	17.08. 14:40	Oberflächenbeschreibung	etwa 13m über Kanalwasserspiegel, oberhalb des Alas, Relief flach, kaum geneigt, Polygontundra über Sanden, unregelmässige <i>low-centre</i> Polygone, etwa 10 - 15m im Durchmesser, Wälle ungleichmässig über Zentren erhoben, etwa 0,3m, Vegetation: 100% Bedeckung, Seggen, Moose, Flechten, <i>Salix sp.</i> , Wälle gut bis mässig drainiert, Zentren schlecht drainiert, vereinzelte Polygone mit überwachsenen Tümpeln und/oder degradierten Wällen, AL: 20, 26, 27cm Moosfleck/Center, 40, 49, 39cm Wall, 43, 42cm Zentren mit 5 - 10cm steh.Wasser

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T005	123° 45' 4.29" E 72° 58' 32.51" N	17.08. 14:59	Oberflächenbeschreibung	Alaswall, Relief zum Alas hin leicht geneigt 1 - 5°, Oberfläche trocken, gut drainiert, Vegetation: vor allem Moose und Flechten, Wuchshöhe ca. 3cm, undeutliche Polygonstruktur, Frostrisse erkennbar, verbreitete Frostbeulen (Hummock ähnlich), AL: 70 - 75cm, über Frostrissen 53, 59, 60cm
T006	123° 45' 7.61" E 72° 58' 25.81" N	17.08. 15:26	Oberflächenbeschreibung	Boden der Alassenke mit riesigen orthogonalen Polygonen, 35 - 40m im Durchmesser, Polygone verlaufen hangparallel, scheinen sich an alten Seeterrassen zu orientieren, oft langgestreckte, durchgezogene parallele Wälle, Querverbindungen sind schwer zu erkennen, Vegetation: 90 - 100% Bedeckung, dazwischen stehendes Wasser, Zentren mit vor allem Seggen und Moosen, weniger <i>Salix sp.</i> , auf den Wällen weniger Seggen
T007	123° 45' 14.12" E 72° 58' 24.95" N	17.08. 15:40	Oberflächenbeschreibung	Mikropingo, Höhe 40 - 50cm, Durchmesser 8m, ca. 15m von etwa 60 - 80cm hoher Seeterrasse entfernt, umgeben von sumpfigen Terrain, darin AL: 25cm und 10 - 15cm Wassertiefe, kleine Grabung im Mikropingo zeigt 20 bis 25cm Organik und Vegetationsdecke (vor allem Gräser) über Eis, mehrere ähnliche Strukturen am Standort zu erkennen
T008	123° 48' 18.90" E 72° 57' 51.40" N	18.08. 10:30	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Sandfläche etwa 8m über Kanal geht über in steiles Uferkliff, Relief eben, Untergrund sandig, trocken, Vegetation: spärlich bewachsen, 60% Bedeckung, Moose, Flechten, Kräuter und vereinzelte Gräser, im Durchschnitt flach, Wuchshöhe ca. 5cm
T009	123° 48' 26.39" E 72° 57' 46.64" N	18.08. 11:30	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	höhere Aue (episodischer Überflutungsbereich), etwa 3 - 4 m über Kanal, Relief flach, eben, Vegetation: 30-40cm Wuchshöhe, Seggen und <i>Salix sp.</i> auf Moosen, als Tussocks verbreitet, dazwischen stehendes, braunes Wasser, AL: 40cm Tussocks, dazwischen ca. 30cm
T010	123° 48' 14.54" E 72° 57' 56.26" N	18.08. 12:15	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Polygontundra, etwa 5 - 6m über Kanal, Relief in südwestlicher Richtung leicht abfallend, orthogonale <i>low-centre</i> Polygonstruktur, durchschnittlich 12 - 18m im Durchmesser, Zentren mit etwa 10cm stehendem Wasser, Wälle trockener etwa 50cm hoch, Vegetation: Polygonwälle mit Moose, Seggen, Gräser, <i>Betula sp.</i> , <i>Salix sp.</i> , <i>Dryas sp.</i> , diverse Flechten, einige Kräuter, Zentren mit <i>Sphagnum sp.</i> und Seggen, Tussock ähnlich, vereinzelt Wollgras, AL: zwischen 30 und 40cm Wall, durchschnittlich 45cm Zentren
T011a	123° 47' 29.47" E 72° 58' 9.25" N	18.08. 14:00	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Aue (jährlicher Überflutungsbereich), Relief leicht vom Alas zum Kanal hin abfallend, Boden relativ feucht, teils stehendes Wasser, verbreitet Schwemmhölzer, Vegetation überwiegend <i>Salix sp.</i> und Seggen auf Moospolster, vereinzelte Wollgrasflächen
T011b	123° 47' 3.84" E 72° 58' 13.86" N	18.08.	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Aue (jährlicher Überflutungsbereich), rötliches Gras ( <i>Arctophylla sp.</i> ) dominiert die Bedeckung, etwa 30 - 50cm hoch, dazwischen vereinzelt trockene Wollgräser, Vegetation vom Wind etwas umgelegt, Bedeckungsgrad 80 - 90 %, sehr feuchter Boden zwischen der Vegetation, teilweise 2-3 cm stehendes Wasser, AL: zwischen 70 und 80 cm
T012	123° 46' 41.09" E 72° 58' 6.26" N	18.08.	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Alassenke, relativ ebenes Gelände, undeutliche <i>low-centre</i> Polygonstruktur, Boden relativ feucht, mässig drainiert, Vegetation: Moose und Seggen, vereinzelt Wollgräser, an trockeneren Stellen mehr <i>Salix sp.</i> , Wuchshöhe 20 -30cm, vereinzelte Treibholzstämmen, AL: etwa 30cm Wall, 35 - 40 cm feuchte Bereiche
Ebe-2	123° 36' 23.10" E 72° 55' 37.47" N	19.08. 15:20	Oberflächenbeschreibung	Ostwall einer grossen Alassenke, ca. 10m über Alasboden, Hang durchschnitten von Thermoerosionstäichen, zahlreiche Tiergänge, Untergrund trocken, sandig, Vegetation: 100% Bedeckung, vor allem Grastussocks, AL: durchschnittlich 75cm
Ebe-3	123° 36' 6.43" E 72° 55' 33.15" N	19.08. 17:27	Oberflächenbeschreibung	Hang des Ostwall, 40° zur Senke geneigt, gut drainiert, Vegetation: 100% Bedeckung, <i>Dryas sp.</i> , Flechten, Moose, vereinzelt Kräuter

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T013	123° 36' 12.59" E 72° 55' 30.96" N	19.08. 17:17	Oberflächenbeschreibung	Plateaufläche am Oberhang des Alaswall, zirka 10 - 12m über der Senke, Relief gering geneigt, Oberfläche sehr trocken, Vegetation: 100% Bedeckung, trockene Moose, Flechten, Seggen und <i>Salix sp.</i> , Wuchshöhe 2 - 10cm, AL: 25 - 28cm an 4 Stellen
T014	123° 37' 22.35" E 72° 55' 38.77" N	19.08. 18:17	Oberflächenbeschreibung	Tundra, Hang etwa 5 - 10° Neigung, keine Polygonstruktur, Vegetation: 100% Bedeckung, Grasstussocks, Seggen, <i>Salix sp.</i> , trockene Moose, <i>Betula sp.</i> , AL: 23 - 30cm an 4 Stellen
T015	123° 40' 29.29" E 72° 55' 47.48" N	19.08. 18:52	Oberflächenbeschreibung	Tundra, Hang etwa 5 - 10° Neigung, gut drainiert, Vegetation: 100% Bedeckung, Grasstussocks auf Moospolster, <i>Salix sp.</i> , <i>Betula sp.</i> , AL: 20 - 35cm an 6 Stellen
T023	123° 47' 55.29" E 72° 58' 4.75" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	auslaufendes Sandkliff am Kanal und Übergang in die Aue, etwa 6m hoch spärlich bewachsen mit vor allem Zwergsträuchern und Gräsern, landeinwärts weiteres, stärker bewachsenes (100% Bedeckung), älteres Kliff (ältere Uferlinie), etwa 4m hoch, erstes Kliff gekennzeichnet durch Schwemmholtzsaum, am zweiten Kliff weiterer Schwemmholtzsaum, zweites Kliff schwenkt am Ausgang eines Alas im rechten Winkel nach SW, geht in Ostwall des Alas über
T024	123° 47' 27.96" E 72° 58' 5.69" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	NO Ecke des Alas, Übergang eines alten Uferkliff in Alaswall, Wall etwa 2m hoch, Hang sehr flach, seicht ansteigend, typischer Vegetationswechsell von Alassenke zum Wall, grüne von Gräsern dominierte Vegetation geht über in trockene, graubraune Hummock-Oberfläche, Oberhang mit typischer <i>high-centre</i> Hummock-Oberfläche, sandiger Untergrund, Vegetation: Flechten, trockene Moose, vereinzelte Gräser, Übergang vom Wall in feuchte Gras reiche Polygontundra, AL: 60 - 80cm
T025	123° 46' 51.46" E 72° 58' 8.35" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Ausgang der Alassenke in Aue über etwa 2m hohe leicht abfallende Stufe, gekennzeichnet durch Schwemmholtzsaum, Stufe in der Alassenke gekennzeichnet durch Polygongrenzen, unregelmässige <i>low-centre</i> Polygonstruktur öffnet sich zur Aue und geht verloren, Polygone orthogonal 15 - 20m im Durchmesser, Frostrisse verlieren sich in der Aue, Versteilung und Erhöhung der Stufe in Richtung Westen zu Kliff, Vegetation: deutliche Zunahme von <i>Salix sp.</i> in Richtung Aue, mit Erhöhung der Stufe bessere Drainage, Oberfläche ähnlich Alaswall, vor allem Flechten und trockene Moose
T026	123° 45' 20.64" E 72° 58' 35.89" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	NW Ecke des Alas, Westwall des Alas geht über in steiles sandiges Uferkliff, etwa 6m hoch, Vegetation auf dem Kliff: spärlich, vor allem Zwergsträucher und wenige trockene Gräser. Westwall hier steiler, etwa 6m hoch, Plateaufläche auf dem Wall etwa 60m breit geht in <i>low-centre</i> Polygontundra über, Vegetation: Hummock-Oberfläche dominiert von <i>Cassiope tetragona</i> , reichlich Flechten, trockenen Moosen, Zwergsträucher, wenige trockene Gräser, AL: 60 - 70cm
T027	123° 44' 56.95" E 72° 58' 27.97" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung, Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Oberhang des Westwall des Alas, etwa 10m über Kanal, Vegetation: <i>Cassiope tetragona</i> , Flechten, Moose, Zwergsträucher, Al: 65cm, Bodentyp: Typic Psammenturbel, fluviale Fein- bis Mittelelsande
T028	123° 44' 58.64" E 72° 58' 27.39" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung, Bodenprofilansprache	Unterhang, Westwall, Übergang von trockener Hummock-Oberfläche in feuchter Moospolster mit aufkommenden Gräsern, sehr feuchter, wassergesättigter, sandiger Untergrund, kliener Aufschluss lässt Sedimentverlagerungen vom Hang vermuten, AL: 40cm
T029	123° 45' 14.30" E 72° 58' 24.95" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Alassenke, mooriger, zuwachsender See innerhalb der Alassenke, Reihe ähnlicher Erhebungen (Mikropingo) am Rand der moorigen Senke verbreitet, etwa 6m Durchmesser, torfige, körnige Eissegregationen im Untergrund, bewachsen mit trockeneren Gräsern auf Moospolster, Vegetation im See: Bereich mit stehenden Wasser, grünen und roten Süßgräsern ( <i>Arctophylla sp.</i> ) auf Sphagnumpolster umgibt kleineren See, zum See dominieren rote Süßgräser, alte Seefläche gekennzeichnet durch alte Uferzone, ca. 50cm Abbruch, am Ufer Schwemmhölzer aufgereiht

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T030	123° 44' 45.43" E 72° 58' 1.47" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Alassenke, Nordufer des nördlichen grösseren Alasee, Uferböschung etwa 1m hoch, Torfe und Moospolster zu erkennen, deutliche parallel zum Seeufer verlaufende <i>low-centre</i> Polygonstruktur grenzt an den See, Buchten im See folgen der Polygonstruktur, Abflachung des Westwall auf Höhe des See
T031	123° 44' 29.31" E 72° 58' 1.87" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Alassenke, langgezogene, geradlinige, parallel zum Westwall verlaufende Polygonwälle, ohne erkennbare Querverbindungen, Abstände zwischen den Wällen etwa 10m, Wälle gut drainiert mit Frostrissen, etwa 50cm hoch, Zentren schlechter drainiert, stehendes Wasser, Vegetation: Zentren mit Seggen auf Moospolster, Wälle mit <i>Salix sp.</i> , niedrigen Gräsern auf Moospolster, AL: durchschnittlich 30cm
T032	123° 44' 6.12" E 72° 57' 59.64" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	auslaufender Westwall, Übergang in <i>low-centre</i> Polygonstruktur, langgestreckter Hang fällt zu südlicheren See stetig ab, orthogonale Polygone (etwa 10m im Durchm.) mit deutlichen bis 1m hohen Wällen, auf den gut drainierten Wällen noch undeutlich die Hummock-Oberfläche ähnlich Alaswall zu erkennen, jedoch höhere Gräsern, Zentren feucht, teils stehendes Wasser, AL: 35 - 45cm Wall, durchschnittlich 40cm Zentren, Wall geht über in Hang der zum nächsten See hin stetig fällt, vereinzelt Schwemmhölzer aber stellenweise überwachsen, in Richtung Westen Übergang aus dem Alas in Polygontundra gekennzeichnet durch deutlich flachere Wälle
T033	123° 43' 24.48" E 72° 57' 56.36" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Westseite der Alassenke, zweiter, südlicher Alasee bildet eine sich nach NW bis zum Alaswall ausbreitende Bucht, am NW Ufer Bildung eines 2m hohen Kliff, Kliff relativ stark zerklüftet, zerfällt nach den Polygonstrukturen, Anschnitt des Alaswall, unter den torfig-moosigen Auflagen treten sandige Sedimente hervor, auf dem Cliff noch 20 - 30m breiter Wall mit Hummock-Oberfläche zu erkennen, Wall setzt sich anschließend an das Kliff nach SW zunächst recht flach fort und scheint im Süden in Höhe eines 3. Alasee deutlich höher zu werden
T034	123° 43' 17.35" E 72° 57' 53.27" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Westseite des Alas, zweiter südlicher Alasee, Wall wird zerschnitten durch Thermoerosionsrinne, Wasser läuft aus kleineren Tümpel oberhalb des Walls in kleines etwa 1,50 tiefes Wasserloch (ehemaliges Polygonzentrum)
T035	123° 43' 6.33" E 72° 57' 44.12" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Alassenke zwischen 2. und 3. Alasee auf der Westseite des Alas, Polygonwälle zeigen langgezogene konzentrische Strukturen, gehen ineinander über, keine Querverbindungen, AL: durchschnittlich 20cm Wall, 35 - 40cm feuchtere Senken/Zentren
T036	123° 42' 59.24" E 72° 57' 31.49" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Alassenke, Nordufer des 3. südlichsten Alasee, etwa 80m vom Ufer entfernt, Gelände fällt von Norden und 2. Alasee ab, etwa 200m breiter Saum in dem keine Polygonstruktur zu erkennen ist, direkter flacher Übergang in das Ufer des Sees, keine Böschung, Untergrund sehr schlecht drainiert, sehr feucht bis stehendes Wasser, Vegetation: relativ hohe Gräsern/Seggen und Wollgräser, <i>Salix sp.</i> auf Moospolster, AL: durchschnittlich 20cm, keine Treibhölzer mehr
T037	123° 43' 30.06" E 72° 57' 19.18" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Ostseite der Alassenke, etwa 300m vom Ostwall und 400m vom 3. See, NO Ecke des Sees, Gelände sehr flach zum See hin abfallend, kaum bis keine Polygonstruktur zu erkennen, Vegetation: 40 - 50cm hohe Seggen und Wollgräser auf <i>Sphagnum sp.</i> -Polster, mooriger Untergrund mit teils bis 20cm stehenden Wasser, dazwischen kleinere Tümpel mit rötlichen <i>Arctophylla sp.</i> , AL: durchschnittlich 40cm
T038	123° 43' 50.36" E 72° 57' 15.32" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Ostwall des Alas, auf Höhe des 3. See, 3-4m über Alassenke erhoben, relativ steil ansteigend, Schwemmhölzsaum am Hangfuss, keine ausgedehnte Plateaufläche am Oberhang, <i>high-centre</i> Hummock-Oberfläche geht rasch über in <i>low-centre</i> Polygonstruktur, mit auffallend hohen Wällen, relativ trocken Oberfläche, dahinter leicht abfallende Oberfläche und Übergang in feuchte <i>low-centre</i> Polygontundra

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T039	123° 43' 58.93" E 72° 57' 19.64" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	auf dem Ostwall des Alas, kurzer Bereich in dem die <i>low-centre</i> Polygone (mit hohen, trockenen Wällen) in auffallende <i>high-centre</i> Polygonstruktur wechselt, Zentren etwa 1,50 erhöht, sandiger Untergrund, gut drainiert, trocken, Hummock-Oberfläche mit Flechten, trockenen Moosen, vereinzelt Gräsern, Frostrisse deutlich eingetieft mit feuchten bis nassen Moosen, vereinzelt <i>Salix sp.</i> , Polygone etwa 12m im Durchmesser, werden zum Hang hin flacher und undeutlicher, AL: 50 - 60cm Zentren, durchschnittlich 30cm Frostrisse, Fläche auf dem Wall etwa 100m lang, deutet auf Degradation des Permafrost im Untergrund, in Richtung Norden Übergang in typische aber nicht sehr breite Alaswall-Oberfläche, in Richtung Osten Übergang vom Alaswall über <i>low-centre</i> Polygone in flache, ebene Grastundra
T040	123° 44' 8.04" E 72° 57' 24.04" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Ostwall des Alas, Durchbruch einer Thermoerosionsrinne, dahinter Richtung Norden deutliche Abflachung des Walls
T041	123° 45' 32.41" E 72° 57' 28.03" N	27.08.	Oberflächenbeschreibung	Ostwall des Alas, zweiter Alasseer grenzt auf der Ostseite des Alas direkt am Hangfuss des Alaswall, kein Anschnitt des Wall zu erkennen, Wall wird wieder höher und steiler, etwa 4 -5m über Seespiegel erhöht, Oberfläche hier auf dem Wall nicht mehr so trocken, Vegetation: höhere Gräser nehmen zu, Hummock-Oberfläche geht verloren
T048	123° 45' 19.56" E 72° 58' 35.17" N	31.08. 11:40	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Sandkliff am Kanal, NW Ecke des Alas, Vegetation: sehr spärlich bewachsen, etwa 20% Bedeckung, herbstliche Zwergsträucher, trockene Gräser und Moose, Wuchshöhe max. 20cm, AL durchschnittlich 1,05m
T049	123° 45' 8.90" E 72° 58' 33.48" N	31.08. 11:52	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Oberhang Westwall des Alas, Hummock-Oberfläche
T050	123° 45' 6.67" E 72° 58' 35.21" N	31.08. 12:26	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Übergangsbereich vom Alaswall in Tundra, <i>low-centre</i> Polygonstruktur, Polygone etwa 10 - 12 m im Durchmesser, Polygonzentren etwa 6 m, auffällig hohe Polygonwälle 50 - 100cm erhöht, Vegetation: Polygonzentren mit 10cm stehendem Wasser, vor allem Seggen (30 - 40 cm Wuchshöhe), teils vertrocknet, etwa 60% Bedeckung, Wälle trocken, Oberfläche ähnlich Alaswall mit Flechten, Moosen, weniger Gräsern
T051	123° 45' 0.55" E 72° 58' 28.04" N	31.08. 13:23	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Alassenke, Untergrund sehr feucht mit stehendem Wasser, undeutliche Polygonstruktur, langezogene, parallel zum Alaswall und Seeufer verlaufende Wälle, ohne deutliche Querverbindungen, dazwischen Senkenbereiche/Zentren sehr feucht, schlecht drainiert
T052	123° 45' 34.32" E 72° 58' 24.80" N	31.08. 14:13	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Schwemmholtzsaum, am nördlichen den Alas zum Kanal hin begrenzenden Kliff
T053	123° 48' 30.02" E 72° 57' 46.82" N	31.08. 15:52	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	höhere Aue (episodischer Überflutungsbereich), Vegetation: siehe T009 herbstlich gefärbt und trockenere Gräser, Wuchshöhe 20 - 30 cm, AL: zwischen 35 und 40 cm
<b>Turakh-Sise 2.Terrasse</b>				
Alassenke	123° 48' 56.69" E 72° 58' 34.16" N	20.08.	Oberflächenbeschreibung, Geländeerkundung	grosse ausgedehnte Alassenke mit 2 grossen elliptisch geformten, orientierten Seen, Alasboden fällt zu den Seen hin leicht ab, Schwemmhölzer im Alasbecken verbreitet, Entwässerung und Verbindung zum Kanal über mäandrierendes Thermoerosionstächen und schmalen Bach mit ausgeprägten Prall- und Gleithängen, Tälchen etwa 80 - 100m breit, Talboden 3m unter Alasboden, in Alassenke keine deutliche Seeterrassierung zu erkennen, auffällig parallel zum Seeufer verlaufende Polygonwälle
T016	123° 48' 54.64" E 72° 58' 42.44" N	20.08. 17:31	Oberflächenbeschreibung	Alassenke, westliches Seeufer, wahrscheinlich ehemaliger Seeboden, Relief eben, Oberfläche schlecht drainiert, etwa 5cm stehendes Wasser, keine Tümpel, Vegetation: Seggentussocks, Moospolster im stehende Wasser, AL: durchschnittlich 30cm, 25 - 50cm auf trockeneren Wällen



Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T017	123° 47' 57.01" E 72° 58' 24.23" N	20.08. 19:41	Oberflächenbeschreibung	Plateaufläche über Alassenke, etwa 5,5m über Flussniveau, Oberfläche schlecht drainiert, keine Tümpel, <i>low-centre</i> Polygonstruktur, Polygone unregelmässig bis hexagonal, Wälle trockener 20 - 50cm erhöht, Vegetation: 100% Bedeckung, Moose, Gräser, <i>Salix sp.</i> , Flechten, Wuchshöhe 2 - 10cm, auf den Wällen mehr Flechten und Moospolster, AL: ca. 30cm trockene Bereiche, 40cm Zentren, 35 - 40cm an 4 Stellen Wall
Test-bodenprofil	123° 48' 34.23" E 72° 58' 47.05" N	20.08.	Oberflächenbeschreibung, Bodenprofilansprache	Westwall des Alas, Oberhang, trockene, gut drainierte Hummock-Oberfläche, Vegetation: sehr geringe Wuchshöhe (ca. 3cm), Moospolster, <i>Dryas sp.</i> , Rentierflechte, diverse Flechten, Gräser, <i>Salix sp.</i> , AL: ca.70cm, Boden zeigt Kryoturbationsmerkmale, Vermischung von organischen Material, Horizontierung und Taschenbildung, Fein- bis Mittelsande
Tur1	123° 47' 49.49" E 72° 58' 23.47" N	20.08. 13:20	Aufschlussansprache, Oberflächenbeschreibung	steiles Sandkliff am Süden der Deltainsel zum Arinskaya-Kanal, Geländeoberfläche am Kopf des Aufschluss spärliche bewachsen mit trockenen Gräsern, Aufschluss etwa 4m mächtig, zeigt spezifische Vernetzungen von Eisadern und -keilen, obersten 1 - 1,5m zeigen horizontal geschichtete helle Sande, darunter bis zur Permafrostoberfläche bei etwa 2,5m Wechsel verschiedener sandiger Horizonte mit gräulichen und/oder bräunlichen Schlieren, etwa bei 2m braunschwarzer, organikreicher Horizont mit grösseren Holzeinschlüssen, graue Farben und Schlieren (Redoxmerkmale) im gesamten Profil deuten auf Veränderungen des Stau- und Grundwasserspiegels mit episodischen Schwankungen der Permafrostoberfläche
T018	123° 51' 2.25" E 72° 58' 44.14" N	23.08.	Oberflächenbeschreibung	Oberhang des Ostwall der Alassenken, etwa 6m über Hangfuss 2 - 5° Neigung, AL: 67, 68, 63cm, allg. Osthang der Alassenke flacher als Westhang, terrassiert ansteigend, Westhang höher und exponierter, kleinerer Südwall des Alas durch kleinere Tümpel unterbrochen, etwa 1,5 - 2m hoch, alle Wälle (Hänge) des Alas zeigen auffallend ähnliche Hummock-Oberflächen und Vegetation, diese sind trocken, gut drainiert, Vegetation in sehr geringer Wuchshöhe (2 - 10cm) vor allem trockene Moospolster und Flechten sowie Zwergsträucher, weniger Gräser, Frostbeulen (Hummocks) bewachsen mit Krustenflechten, stellenweise aufgebrochen, auf den Wällen häufig unregelmässige <i>high-centre</i> Polygonstruktur, Frostrisse deutlich zu erkennen ziehen sich stellenweise bis in die Senke, graubraun erscheinende Vegetation der Wälle geht am Unterhang, fächerförmig erscheinend, in grünere, grasreiche Vegetation über, Plateaufläche am Oberhang des Osthang ist etwa 30 - 50m breit und geht in feuchtere <i>low-centre</i> Polygontundra über, Hummocks werden vom Oberhang zum Unterhang undeutlicher, rasche Abnahme des AL am Übergang vom Unterhang in die Senke von 70cm auf 30cm
Tur-Lake-5	123° 50' 5.41" E 72° 58' 53.89" N	23.08.	Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Südostufer des Alassees, etwa 80cm hohes Erosionskliff, Vegetation am Ufer: vor allem Seggen, vereinzelte Moose, AL unter Seewasserspiegel im Uferbereich bei etwa 50cm, Bodentyp: Typic Fibristil, verschiedene Torfhorizonte, limnische Sedimente
T019	123° 50' 6.31" E 72° 58' 53.89" N	25.08. 13:15	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Alassenke, südlicher See, südliches Seeufer, Vegetation: 100% Bedeckung, mehr oder weniger einheitlich <i>Salix sp.</i> zwischen teils trockenen Gräsern auf Moospolster, vereinzelte Wollgräser, Wuchshöhe etwa 30cm, AL: durchschnittlich 30cm
Tur-Lake-9-1	123° 50' 57.54" E 72° 58' 41.62" N	25.08.	Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Ostwall des Alas, Oberhang, ca. 6m über Hangfuss, Hummock-Oberfläche, Vegetation: trockene Moospolster, Flechten, <i>Dryas sp.</i> , wenige Gräser, AL: 75cm, Bodentyp: Typic Psammenturbel, fluviale Fein- bis Mittelsande
Tur-Lake-9-2	123° 50' 53.07" E 72° 58' 42.44" N	25.08.	Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Ostwall des Alas, Mittelhang, ca. 4m über Hangfuss, Vegetation: <i>Dryas sp.</i> , Flechten, trockene Moose, vereinzelte Gräser, AL: 80cm, Bodentyp: Typic Psammenturbel, fluviale Fein- bis Mittelsande

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
Tur-Lake-9-3	123° 50' 49.91" E 72° 58' 43.06" N	26.08.	Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Ostwall des Alas, Unterhang, ca. 3m über Seespiegel, Übergangsbereich von Hummock-Oberfläche des Wall in Grass reichere, schlecht drainierte Alassenke, Vegetation: Moose, Rentierflechte, mehr Gräser, weniger Zwergsträucher, AL: 70cm, Bodentyp: Psammentic Aquorthel, fluviale Fein- bis Mittelsande
Tur-Lake-9-4		26.08.	Bodenprofilaufnahme (Soil-Tax.)	Alassenke etwa 10m vom Unterhang des Ostwall des Alas, ca. 2m über Seespiegel, Untergrund sehr feucht, schlecht drainiert, Vegetation: Gräser auf Moospolster, Bodentyp: Typic Aquorthel, Seeablagerungen, Auensedimente
T020	123° 49' 53.57" E 72° 59' 38.78" N	26.08.	Oberflächenbeschreibung	Westseite der Alassenke zwischen den zwei Alasseen, etwa 150m vom Ufer des nördlichen See, Seen verbunden über ein Tälchen und kleinen Bach, am Standort kleine Erhebung mit Eissegregation in 25cm Tiefe (Mikropingo), etwa 10 x 6m Durchmesser, Höhe 1m, Oberfläche trocken, gut drainiert, Vegetation: Gräser auf trockeneren Moospolster, Wuchshöhe etwa 20cm
T021	123° 49' 40.35" E 73° 0' 2.94" N	26.08.	Oberflächenbeschreibung, Aufschlussansprache	Sandkliff etwa 3m hoch am nordwestlichen Ufer des nördlichen See, etwa 400m vom westlichen Alaswall entfernt, See bildet kleine flache Bucht an dieser Stelle, auf dem Kliff terrassierte, sichelförmige Dünen, nach Osten geöffnet, gegenüberliegenden Seeufer 1m hoch mit Torfaufschlüssen, Aufschluss zeigt verschieden sandige Horizonte mit Redoxmerkmalen über die gesamte Höhe, AL: ca. 1,15m, Vegetation: spärlich, wenige trockene Gräser und Zwergsträucher
T022a	123° 51' 10.56" E 72° 59' 38.10" N	26.08.	Oberflächenbeschreibung	flacher werdender Ostwall der Alassenke, etwa zwischen den Seen, kurzer Bereich auf dem Wall in dem die <i>high-centre</i> Hummock-Oberfläche in eine <i>low-centre</i> Polygonstruktur wechselt, auffallend hohe Polygonwälle, Polygone ca. 10m Durchmesser, Vegetation: Zunahme von Gräsern und <i>Salix sp.</i> auf Moospolster, in Frostrissen stehendes Wasser, AL: Abnahme von Hummock-Oberfläche, 30 - 40cm Zentren, 50 - 70cm Wall
T022b	123° 51' 16.47" E 72° 58' 52.24" N	26.08.	Oberflächenbeschreibung	Ostseite der Alassenke, undeutliche, langgestreckte Polygonstruktur verläuft subparallel zum Seeufer, kaum Querverbindungen zu erkennen, in Richtung des nördlichen See deutlichere Polygonstruktur, mäandrierende Wälle, keine Frostrisse, Wälle relativ trocken etwa 50cm hoch, Zentren mit 10cm stehenden Wasser, Vegetation: Zentren mit Seggen auf Moospolster, Wälle mit mehr Moose und trockene Gräser, AL: 40 - 60cm Zentren, 30 - 40cm Wall, etwa 100m vom Seeufer 1m hohe seicht zum See hin einfallende Terrassenstufe, unterhalb der Stufe keine Polygonstruktur, Seen verbunden über flaches Bachtälchen, Bachaue kaum zu erkennen, Bach mäandriert leicht, keine Gleit-/Prallhangstruktur, im Vergleich zur Senke relativ trockener Untergrund im Tälchen, Vegetation: Dominanz grüner Gräser, Wuchshöhe 30cm
T054	123° 48' 33.04" E 72° 58' 29.95" N	31.08. 17:41	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Gleithang eines mäandrierenden Bachtälchen, Tälchen führt vom Kanal zum 1. Alasee, Vegetation: vor allem Gräser und Seggen bis 40 cm (Wuchshöhe) auf trockenem Moospolster, kleinere Flächen mit herbstlicher <i>Salix sp.</i> , Bodenverhältnisse wechseln vom Bach zum Hang von feucht bis relativ trocken
<b>Kurungnakh-Sise 3.Terrasse</b>				
Bkh05c	126° 15' 22.57" E 72° 19' 15.88" N	13.08. 18:00	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	über V-förmiges Tal ausgelaufener Alasee, Thermokarsthügel prägen das Bild in der Alassenke und im Tal, Vegetation im Alas: zwischen den Hügeln dominieren bis 50cm hohe Gräser, auf den Hügeln mehr <i>Salix sp.</i> neben Gräsern
Bkh05d	126° 15' 35.53" E 72° 19' 14.95" N	13.08.	Feldspektrometrie, Oberflächenbeschreibung	Oberfläche der 3. Terrasse, sehr flaches Relief, kaum bis keine Polygonstruktur zu erkennen, Vegetation: <i>Salix sp.</i> , Moose und Gräser, teilweise fleckig dominierend

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
<b>Khadang-Sise 3.Terrasse</b>				
Uferkliff	124° 11' 56.85" E 72° 57' 10.37" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	etwa 20m hohes Erosionskliff am Kanalufer, aktive Erosion ist deutlich zu erkennen, nur unter dem Eiskomplex liegenden Sande und Torfe aufgeschlossen
T042	124° 12' 49.41" E 72° 56' 52.22" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	Thermoerosionsschlucht am Ufer des Kanal breit auslaufend, V-förmig tief in die Sedimente eingeschnitten, kleiner Wasserlauf im Grund des Tal, Hänge sehr stark zerklüftet, mit abgerutschten Torfschichten, Hänge spärlich bewachsen, vor allem Gräser, Moose und Zwergsträucher, Schwemmhölzer relativ weit ins Tal hinauf zu finden, Verflachung der Schlucht nach oben, fortschreitende Erosion und Einschnitt des Tals nach oben in die Oberfläche der Terrasse zu erkennen, mächtigen Torfschichten im oberen Teil der Schlucht angeschnitten und aufgeschlossen, hangaufwärts wird die Schlucht flacher, die Talform wird zunehmend U-förmig und verzweigt sich dendritisch, Verbreitung der Täler typisch entlang der Kanalufer der 3.Terrasse
T043	124° 12' 9.52" E 72° 56' 47.90" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	Talaufwärts, Übergang vom V-förmigen zu U-förmigen Thermoerosionstal, an tiefen Furchen ist deutlich das Austauen der Eiskeile im Untergrund und dem Zerfall der Polygonstruktur zu erkennen, Vereinigung der Furchen und Übergang in V-förmigen Talgrund, hangaufwärts Verbreitung des Talgrund, Talgrund hier sehr feucht mit stehenden und fließenden Wasser (sog. Grasflüsse) Vegetation: grüne Seggen und hellgrüne Moosflecken an den Talhängen aufgereiht, Hänge deutl. trockener, besser drainiert, dicht bewachsen mit 30cm hohen Gräsern auf Moospolstern, neben Zwergsträuchern und Flechten, Thermokarsthügel bis 1,50m Höhe auf dem Talhängen verbreitet, AL: ca. 75cm auf den Hügeln, zwischen 40 und 50cm zwischen den Hügeln am Hang, zwischen 40 und 50cm im Talgrund, Bodenaufschluss auf einem Hügel zeigt mächtige dunkelgraue organikreiche Horizonte, zwischen den Hügeln am Hang ist der Boden deutlich wassergesättigter, mit deutlichen rostbraunen Redoxflecken, feinsandige, schluffige Bodenart, Vegetation: auf den Hügeln: Hummocks mit Moosen, weniger flache Gräser und Zwergsträucher zwischen den Hügeln: überwiegend höhere Gräser und <i>Salix sp.</i>
T044	124° 11' 45.48" E 72° 56' 37.00" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	auf der Oberfläche der Terrasseninsel, in Richtung Süden steigt die Terrasse weiter an, zunehmende Verflachung der Täler hangaufwärts, Abflussregime stellenweise nur noch an Vegetationsunterschieden zu erkennen, Vegetation: einheitlich, an trockeneren Stellen vor allem Moose, Flechten und Zwergsträucher, an feuchteren Stellen grüne Gräser auf Moospolster, diese gerinneförmigen Flächen gehen hangabwärts in die Täler über, keine Polystrukturen auf der Oberfläche zu erkennen, Frostrisse ziehen sich unregelmässig über die Oberfläche, AL: zwischen 30 und 40cm an feuchten Stellen, durchschnittlich 40cm an trockeneren Stellen
T045	124° 12' 54.99" E 72° 56' 46.10" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	Kliff am Kanalufer, verbreitet Reste der Thermokarsthügel, alte Polygoncenter bleiben auf dem stark erodierten Kliff stehen, Hügel sind vegetationsfrei, zwischen den Hügeln Austauen der Eiskeile, alte im Eiskomplex vorhandene Polygonstruktur wird somit sichtbar, Polygonstruktur ist auf der Terrassenoberfläche nicht zu erkennen, bis etwa 4m über dem Wasserspiegel sind Sande aufgeschlossen, dann folgen etwa 1,50m mächtige scharf abgegrenzte Torfhorizonte, darüber Übergangszone zum eigentlichen Eiskomplex mit sehr eis- und organikreichen Sedimenten, Eiskomplex ist hier kaum aufgeschlossen

Standort	X / Y	Datum / Uhrzeit	Zweck	Oberflächencharakteristik
T046	124° 12' 11.36" E 72° 57' 2.45" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	U-förmiges Tal am Rand der Terrasseninsel, hangabwärts in Richtung Kanal Übergang in V-förmiges Tal, am Standort etwa 8m hohe relativ steile Hänge, Talbreite von Schulter zu Schulter etwa 80 - 100m, am Hangfuss 20 - 30m, Hangformen asymmetrisch, Osthänge deutlich steiler, Westhänge flacher mit Thermokarsthügeln, Talform erinnert an Gletschertäler, Vegetation: im Talgrund 100% Bedeckung, grüne Gräser/Seggen, teils fließendes Wasser, Hänge besser drainiert, vor allem Zwergsträucher, weniger trockene Gräser auf trockenen Moospolster, AL: zwi. 45 und 50cm im Talgrund, zwi. 40 und 50cm auf den Hängen, im Talgrund teils bis auf die Hänge erkennbare Sedimente auf und zwischen der Vegetation entstammen der jährlichen Schneeschmelze
T047	124° 11' 48.64" E 72° 57' 0.07" N	30.08.	Oberflächenbeschreibung	auslaufendes Thermoerosionstales, frische Abbruchkanten sowie das Aufreißen und die Vertiefung der Frostrisse und Polygonstrukturen deuten auf rezente Aktivität lateraler Thermoverkarstung, in Frostrissen hohe Schmelzwasserabflussraten, deutlich zu erkennender Selbstverstärkungseffekt von Verkarstungsprozesse in Folge von stehendem und fließendem Wasser, Eiskeile tauen im Untergrund auf, bilden Hohlformen und der Boden bricht nach

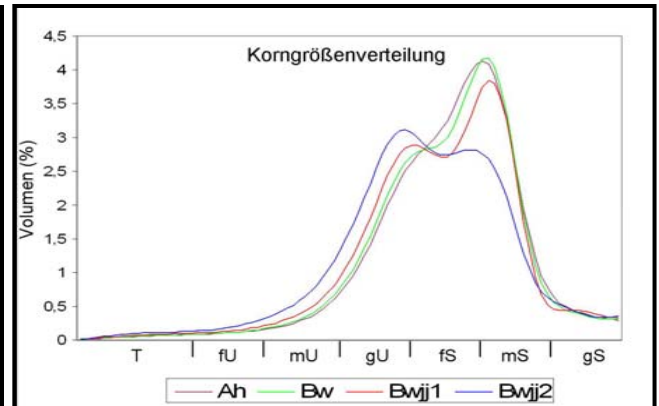
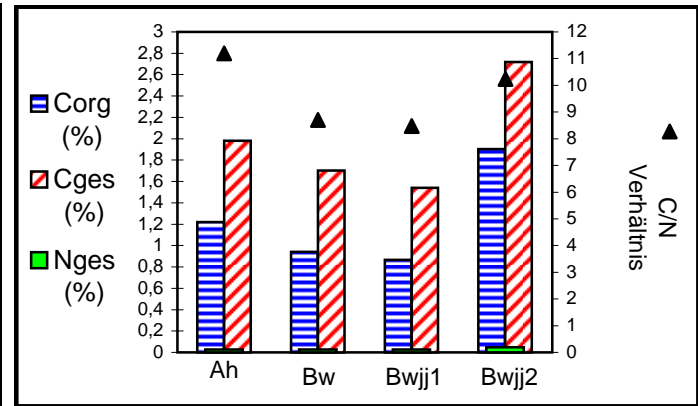
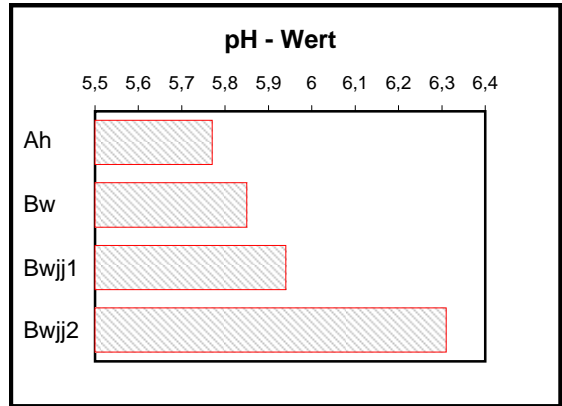
**Profil Name:** Sam1 **Geländehöhe:** ca.12m über Kanalwasserspiegel **Profiltyp:** Aushub  
**Standort:** Samoylov, Lena-Delta **Lage im Gelände:** südl.Spitze der Insel, oberste Akkum.terr., 20m vom Kliff **Auftautiefe:** 28 cm  
**Koordinaten:** 126°28'40.66"E 72°22'1.56"N **Vegetation:** *Salix sp.*, *Moose*, *Carex sp.*, *Dryas sp.*, *Pedicularis sp.* **GW-Stand:**  
**Datum:** 13.08.2005 **Bemerkung:** Frostriss eines Polygon, über juvenilen Eiskeil, Kryoturbation, Humusakkumulation, Lösungsverlagerung, Sandeinwehung,  
**Substrat:** alluviale Feinsande

**Soil-Tax:** Glacis Psammenturbel **WRB:** Glaci-Turbic Cryosol **KA4:** Auenregosol



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
+10	O		Kohärent		W5		Auflage, Einwehung äolischer Sedimente
0 - 2	Ah <sup>1)</sup> (Ah)	fS		2,5Y2,5/1	W4	h2	
2 - 5	Bw (M1)	Su2		2,5Y3/1	W3	h1	
5 - 12	Bwjj1 (M2)	Su4		2,5Y3/2	W3	h2	
12 - 18	Bwjj2 (M3)	Us		2,5Y2,5/1	W1	h2	Anreicherung org.Substanzen über dem Permafrost
> 18	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: h illuviale Akkum.org.Materials, jj Kryoturbation, w Entwicklung von Farbe und Struktur, f permanent gefroren



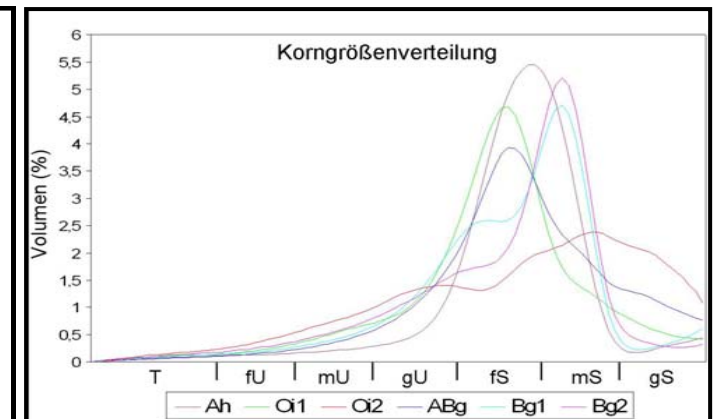
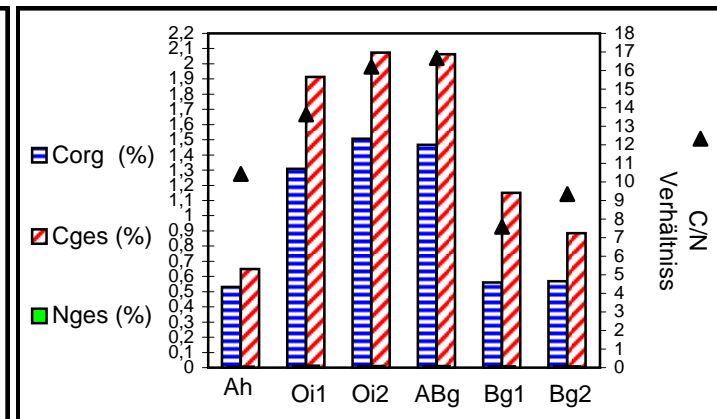
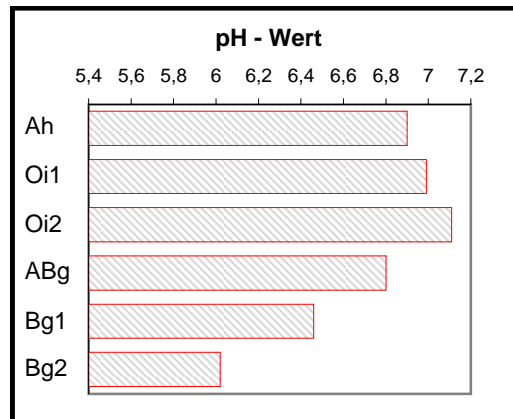
<b>Profil Name:</b> Sam4	<b>Geländehöhe:</b> ca.6m über Kanalwasserspiegel	<b>Profiltyp:</b> Spatenstich
<b>Standort:</b> Samoylov, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> niedere (episodische) Überflutungsebene	<b>Auftautiefe:</b> 45cm
<b>Koordinaten:</b> 126°28'27.09"E 72°22'13.22"N	<b>Vegetation:</b> <i>Salix sp.</i> , Seggen, <i>Polygonum sp.</i>	<b>GW-Stand:</b> 30cm
<b>Datum:</b> 13.08.2005	<b>Bemerkung:</b> Begrabung alter O-Lagen durch häufige Überflutung, Redoxmerkmale, Humusakkumulation, Hydromorphie	
<b>Substrat:</b> fluviale Sande		

<b>Soil-Tax:</b> Psammentic Aquorthel	<b>WRB:</b> Gleyic Crysol	<b>KA4:</b> Auenregosol
---------------------------------------	---------------------------	-------------------------



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 3	Ah <sup>1)</sup> (MAh)	fS	Kohärent bis Einzelkorn	2,5Y3/3	W3	h2	
3 - 6	Oi1 (fOM)	Su2		2,5Y2,5/1	W4	h3	begrabene O-Lagen aus Moosen, mit mineral. Anteil
6 - 12	Oi2 (fO)	H	Torf	10YR3/4	W5	h4	Moostorf
12 - 17	ABg (AhGo)	Su2	Kohärent bis Einzelkorn	2,5Y2,5/1	W3	h2	Humusbetont
17 - 22	Bg1 (Go)	mS		(2,5Y2,5/4 Rostflecken) 5Y2,5/2	W1	h1	mehr als 60% Redoxflecken, Reaktion mit Dipyridil
22 - 45	Bg2 (Gr)	fS/mS		3/10Y	W1	h0	
> 45	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: h illuviale Akkum.org.Materials, i schwach zersetztes org.Material, g Hydromorphie, f permanent gefroren



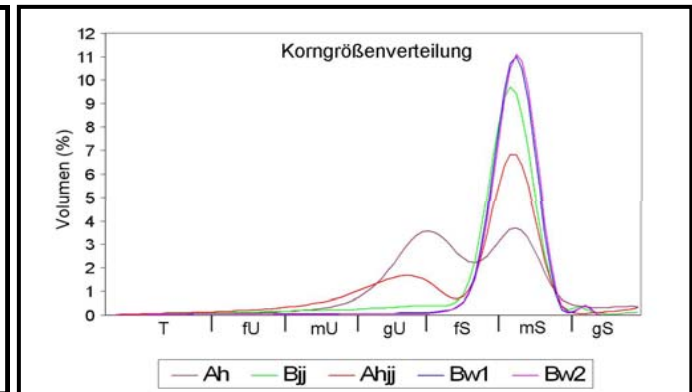
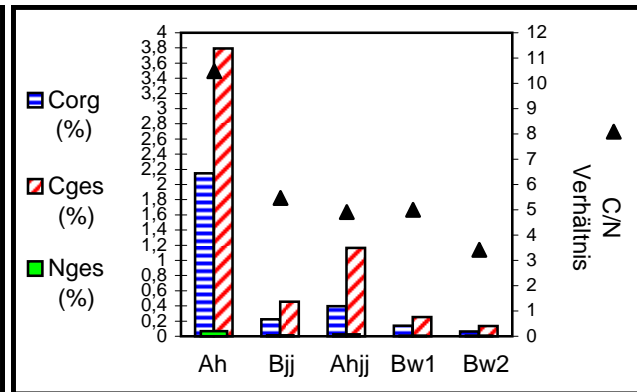
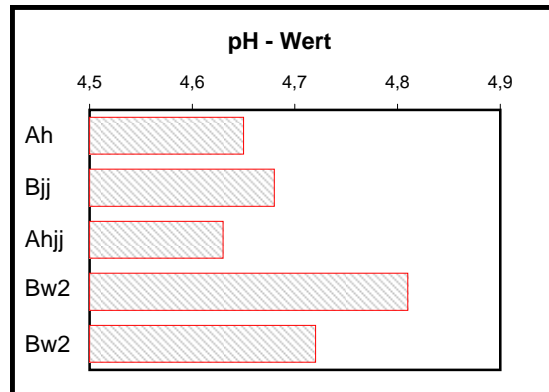


<b>Profil Name:</b> T027	<b>Geländehöhe:</b> ca.6m über Alassenke	<b>Profiltyp:</b> Aushub
<b>Standort:</b> Ebe-Basyn-Sise, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> Westwall eines Alas, Oberhang	<b>Auftautiefe:</b> 65 cm
<b>Koordinaten:</b> 123°44'56.95"E 72°58'27.97"N	<b>Vegetation:</b> Flechten, Moose, Zwergsträucher, wenig Gräser	<b>GW-Stand:</b> 60cm
<b>Datum:</b> 27.08.2005	<b>Bemerkung:</b> Kryoturbation, Redoxmerkmale	
<b>Substrat:</b> fluviale Fein- und Mittelsand		
<b>Soil-Tax:</b> Typic Psammenturbel	<b>WRB:</b> Turbic Cryosol	<b>KA4:</b> Regosol



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 4	Ah <sup>1)</sup> (Ah)	fS	Kohärent bis Einzelkorn	7,5YR2,5/1	W4	h3	aufgewölbt, Frostbeule
4 - 10	Bij (MCv)	mS		10YR3/4	W3	h1	taschenartig, kryoturbiert
10 - 18	Ahjj (fAh)	fS		10YR2/1	W2	h3	
18 - 40	Bw1 (Cv1)	mS		10YR3/4	W2	h0	
40 - 65	Bw2 (Cv2)	mS		2,5Y3/3	W0	h0	Oxidationsflecken, grau laminiert
> 65	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: h illuviale Akkum.org.Materials, jj Kryoturbation, w Entwicklung von Farbe und Struktur, f permanent gefroren



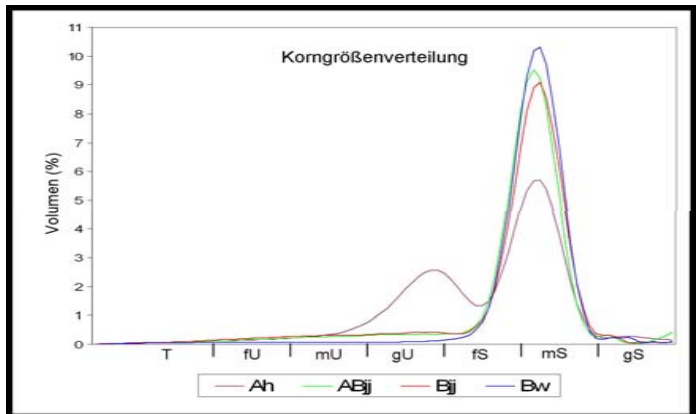
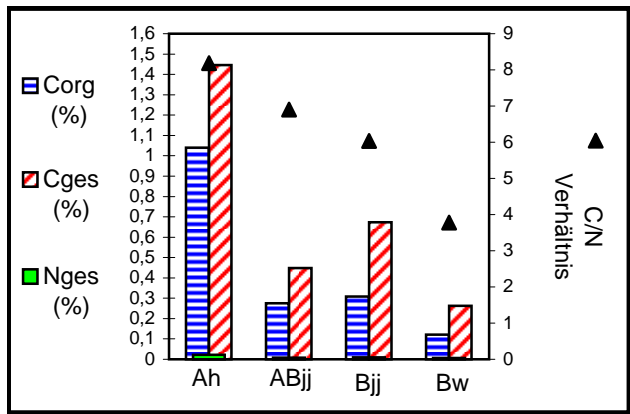
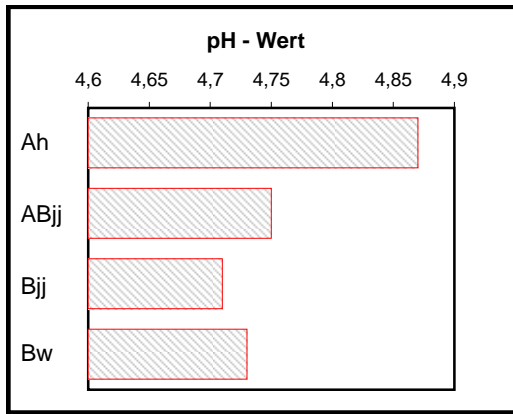
**Profil Name:** Tur-Lake-9-1 **Geländehöhe:** ca.6m über Alassenke **Profiltyp:** Aushub  
**Standort:** Turakh-Sise, Lena-Delta **Lage im Gelände:** Ostwall des Alas, Oberhang **Auftautiefe:** 75 cm  
**Koordinaten:** 123°50'57.54"E 71°58'41.62"N **Vegetation:** trockene Moose, Flechten, *Dryas sp.*, weniger Gräser **GW-Stand:**  
**Datum:** 25.08.2005  
**Substrat:** durch Flugsand überprägte alluviale Fein- und Mittelsand **Bemerkung:** Kryoturbation, Vermischung von organischen Material, Einwehung äolischen Materials

**Soil-Tax:** Typic Psammenturbel **WRB:** Turbic Cryosol **KA4:** Regosol



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 3	Ah <sup>1)</sup> (Ah)	fS	Einzelkorn	7,5YR2,5/1	W2	h2	
3 - 36	ABjj (ABv)	mS		10YR3/4	W3	h1	kryoturbirt, schwarze Schlieren und Flecken
36 - 46	Bjj (Cv)	mS		7,5YR3/2	W1	h1	kryoturbirt, schwarzes, humoses, gewelltes Band
46 - 75	Bw (IICv)	mS		10YR3/3	W0	h0	
> 75	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: h: illuviale Akkum.org.Materials, jj: Kryoturbation, w: Entwicklung von Farbe und Struktur, f: permanent gefroren





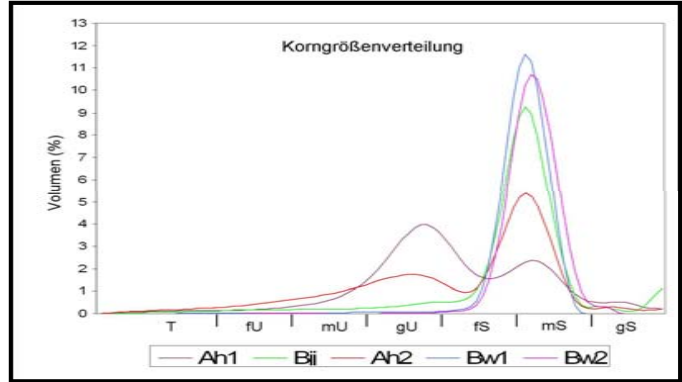
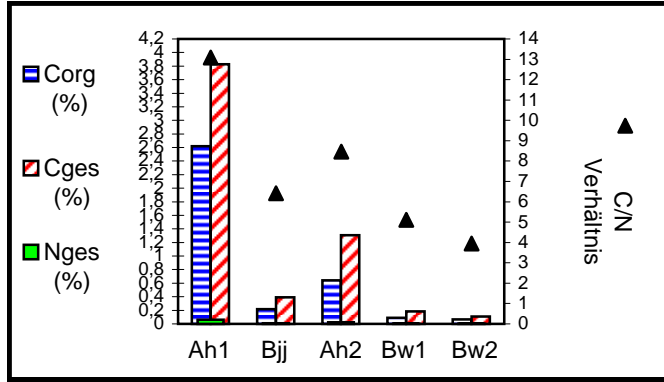
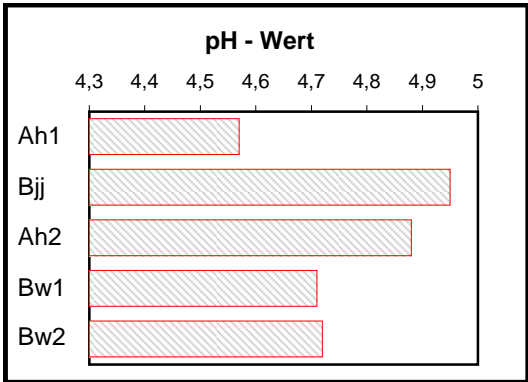
<b>Profil Name:</b> Tur-Lake-9-2	<b>Geländehöhe:</b> ca.4m über Alassenke	<b>Profiltyp:</b> Aushub
<b>Standort:</b> Turakh-Sise, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> Ostwall des Alas, Mittelhang	<b>Auftautiefe:</b> 80 cm
<b>Koordinaten:</b> 123°50'53.07"E 72°58'42.44"N	<b>Vegetation:</b> Dryas sp., Flechten, trock.Moose, vereinzelt Gräser	<b>GW-Stand:</b>
<b>Datum:</b> 25.08.2005	<b>Bemerkung:</b> Solifluktion und Kryoturbation, unterschiedliche Materialien auf alter Oberfläche, Reduktionsmerkmale über Permafrostoberfläche	
<b>Substrat:</b> fluviale Fein- bis Mittelsande		

<b>Soil-Tax:</b> Typic Psammenturbel	<b>WRB:</b> Turbic Cryosol	<b>KA4:</b> Regosol aus sandiger Fließerde über begrabenen Regosol aus alluvialen Sediment
--------------------------------------	----------------------------	--



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 5	Ah <sup>1</sup> 1 (Ah)	fS	Einzelkorn	7,5YR2,5/1	W1	h3	aufgewölbt
5 - 13	Bjj (MCv)	mS		10YR3/3	W2	h1	kryoturbiert
13 - 20	Ah2 (fAh)	fS		10YR2/2	W1	h2	
20 - 40	Bw1 (Cv1)	mS		10YR4/6	W1	h1	
40 - 80	Bw2 (Cv2)	mS		10YR3/4	W0	h1	graue Lamienierung
> 80	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: h illuviale Akkumulation org. Materials, jj Kryoturbation, w Entwicklung von Farbe und Struktur, f permanent gefroren

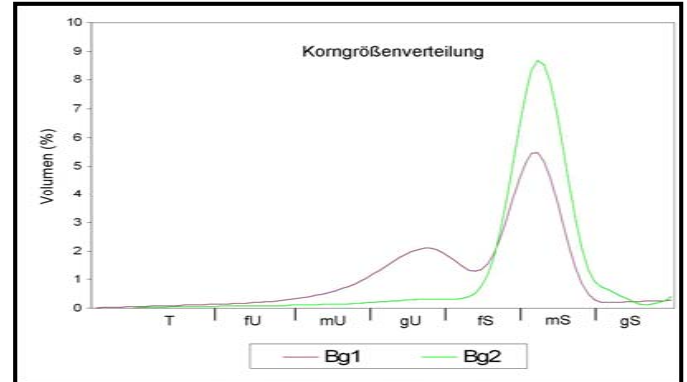
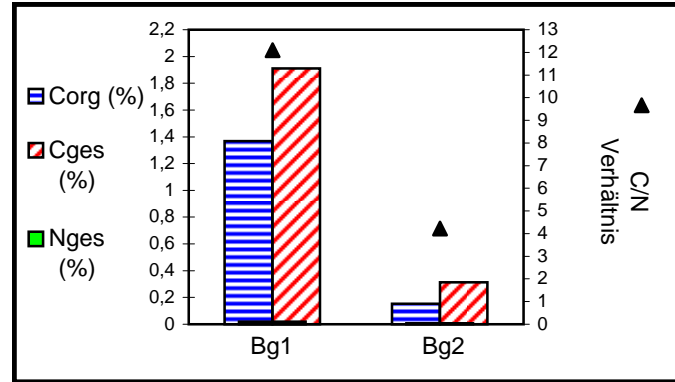
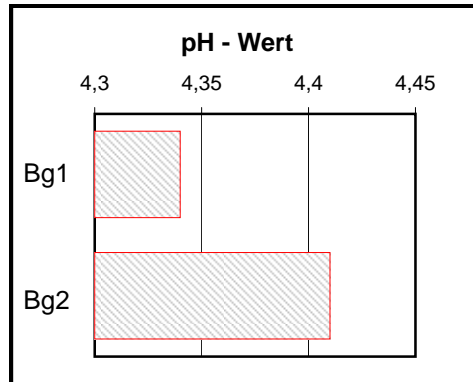


<b>Profil Name:</b> Tur-Lake-9-3	<b>Geländehöhe:</b> ca.3-4m über Seespiegel	<b>Profiltyp:</b> Aushub
<b>Standort:</b> Turakh-Sise, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> Ostwall des Alas, Unterhang	<b>Auftautiefe:</b> 70 cm
<b>Koordinaten:</b> 123°50'49.91"E 72°58'43.06"N	<b>Vegetation:</b> Moose, Rentierflechte, Gräser, Zwergsträucher	<b>GW-Stand:</b> 40 cm
<b>Datum:</b> 26.08.2005	<b>Bemerkung:</b> Oxidationsmerkmale, Verlagerung von Organik, Redoxmerkmale, Hydromorphie	
<b>Substrat:</b> fluviale Fein- und Mittelsande	<b>WRB:</b> Gleyic Cryosol	<b>KA4:</b> Anmoorgley
<b>Soil-Tax:</b> Psammentic Aquorthel		



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
+2	O		Kohärent bis Einzelkorn				Auflage
0 - 3	Ah <sup>1)</sup> (Aa)	fS		7,5YR2,5/1	W4	h4	anmoorig
3 - 18	Bg1 (Go)	mS		10YR2/1	W3	h2	rostfleckige Bänder, schwarze Flecken, zwischen den Bändern Reaktion mit Dipyridil
18 - 70	Bg2 (Gr)	mS		10YR3/3	W2	h1	reduziert, Wasser gesättigt
> 70	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: illuviale Akkumulation org. Materials, g Hydromorphie, f permanent gefroren

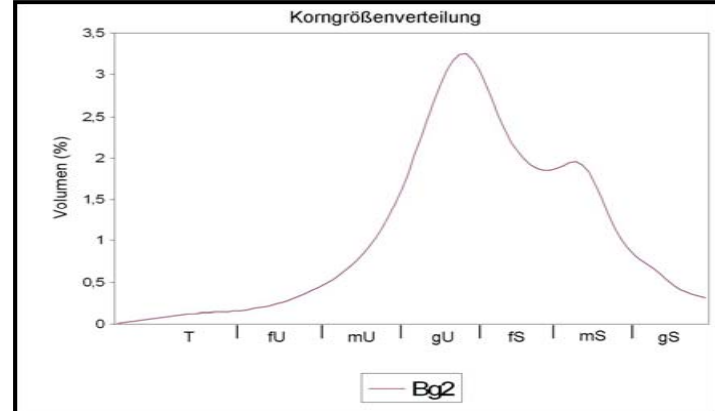
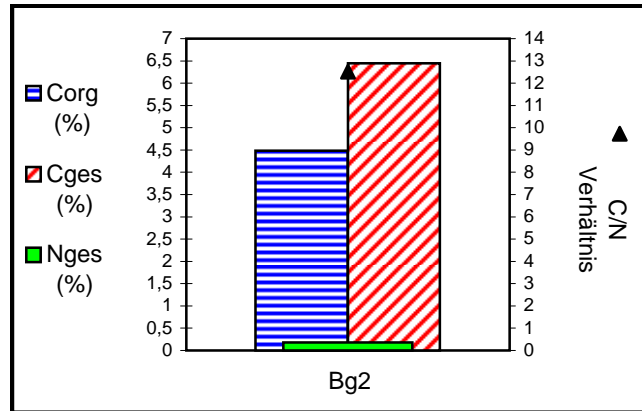
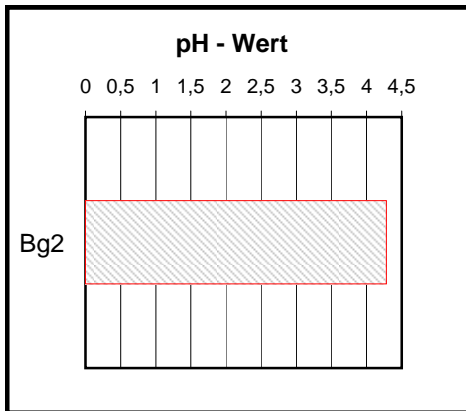


<b>Profil Name:</b> Tur-Lake-9-4	<b>Geländehöhe:</b> ca.2-3m über Seespiegel	<b>Profiltyp:</b> Spatenstich
<b>Standort:</b> Turakh-Sise, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> Alassenke, 10m vom Unterhang,	<b>Auftautiefe:</b> 30 cm
<b>Koordinaten:</b>	<b>Vegetation:</b> Gräser auf Moospolster	<b>GW-Stand:</b> 30 cm
<b>Datum:</b> 26.08.2005	<b>Bemerkung:</b> beginnende Vertorfung, Vergleyung, Hydromorphie	
<b>Substrat:</b> Seeablagerung, Auensedimente	<b>WRB:</b> Histi-Gleyic Cryosol	<b>KA4:</b> Nassgley
<b>Soil-Tax:</b> Typic Aquorthel		



Tiefe (cm)	Horizont Soil-Tax. (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe (Munsell)	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 10	Oi <sup>1)</sup> (Hn)		Kohärent				Vertorfung
10 - 12	Bg1 (Go)	fS		10R2,5/2	W4	h4	rostbraun/rotes Band
12 - 30	Bg2 (Gr)	gU/fS		2,5N	W4	h4	reduziert, Wasser gesättigt, Reaktion mit Dipyridil
> 30	Bf (P)						Permafrost

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: i schwach zersetztes org. Material, g Hydromorphie, f permanent gefroren

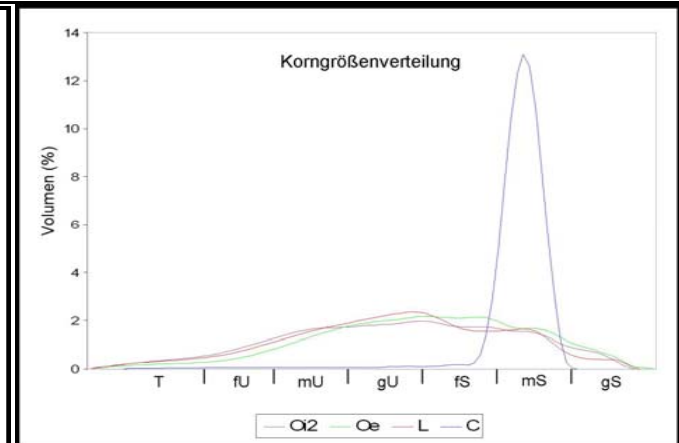
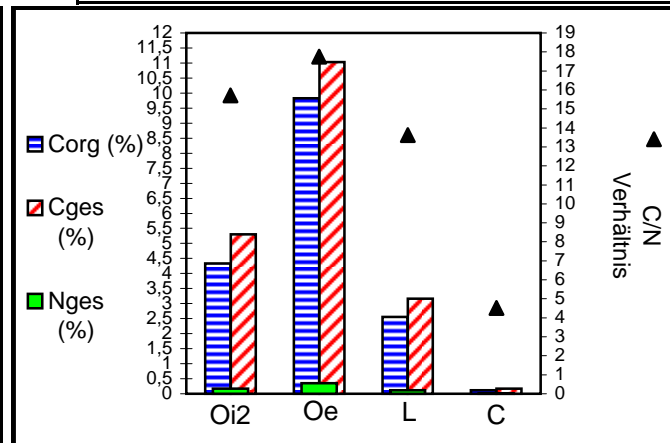
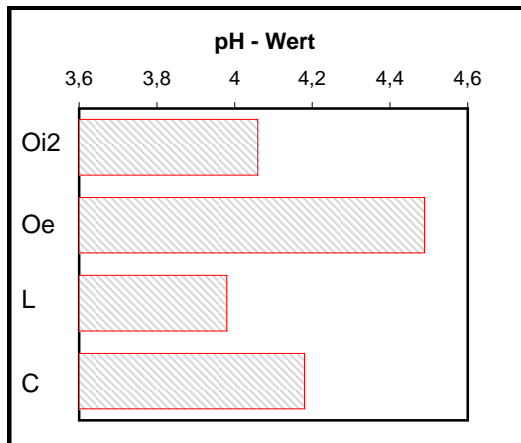


<b>Profil Name:</b> Tur-Lake-5	<b>Geländehöhe:</b> Seespiegel des Alassees	<b>Profiltyp:</b> Aufschluss
<b>Standort:</b> Turakh-Sise, Lena-Delta	<b>Lage im Gelände:</b> Alassenke, südliches Seeufer,	<b>Auftautiefe:</b> 50 cm unter Seewasserspiegel
<b>Koordinaten:</b> 123°50'5.41"E 72°58'53.89"	<b>Vegetation:</b> Seggen und Moose	<b>GW-Stand:</b> 60 cm (Seewasserspiegel)
<b>Datum:</b> 23.08.2005	<b>Bemerkung:</b> Vertorfung, Erosionskliff am Seeufer	
<b>Substrat:</b> Seeablagerung, Auensedimente, Torf		
<b>Soil-Tax:</b> Typic Fibristil	<b>WRB:</b> Histic Cryosol	<b>KA4:</b> Niedermoor über Mudde aus limnischen Sedimenten



Tiefe (cm)	Horizont Soils-Tax (KA4)	Bodenart	Gefüge	Farbe	Durchwurzelung	Humus	Bemerkung
0 - 10	Oi <sup>1</sup> 1 (nHnb)		Torf	sw/gr	W3	h4	verschiedene Torfhorizonte, zunehmende Zersetzung nach unten, rostbraune und schwarze Bänder
10 - 20	Oi2 (nHc)			bn/sw	W3	h4	
20 - 30	Oe (nH)			gr/bn	W3	h5	
30 - 50	L (Fhh)	fS	Kohärent	dgr/bn	W1	h3	reduziert, Wasser gesättigt
> 50	C	mS		dgr	W0	h1	reduziert, Wasser gesättigt, vereinzelte helle Sandlagen

1) Symbole nach US Soil Taxonomy: i schwach zersetztes org. Material, e org. Material mit mittlerer Zersetzung, L limnic



## **MEIN HERZLICHSTER DANK GILT:**

Guido Grosse für die Anregung dieser interessanten Diplomarbeit sowie die stets bereitwillige und ausdauernde fachliche Begleitung und Unterstützung,

Dr. Lutz Schirrmeyer für die gewissenhafte und bereitwillige Betreuung, Unterstützung und Begutachtung dieser Arbeit,

Prof. Jürgen Heinrich für die Erstbegutachtung und das Interesse an dieser Diplomarbeit,

Sabine Chabrilat und Sören Haubrock für die unentbehrlichen Tipps und die fachliche Unterstützung bei allen Fragen der Feldspektrometrie,

Ute Bastian, meinem Freund Moritz Schnelle und allen LaborantInnen für die Analytik der Bodenproben und die stets gemütliche und lustige Atmosphäre zu Cafepausen im Labor,

dem „Lena 2005“-Team für die unvergessliche Zeit im Lena-Delta, Eva-Maria Pfeiffer für die Tipps und die Unterstützung bei der Bodenkartierung im Delta sowie dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, welches mir die Teilnahme an der Expedition ermöglichte,

meinem Vater, Rüdiger Ulrich, für das Korrekturlesen und die „Nachhilfe“ in Rechtschreibung, Grammatik und Ausdruck,

meinen „Mitdiplomandinnen“ Anne, Julia, Franzi und Juliane für die seelisch-moralische Unterstützung, den lohnenden Austausch über alle Fragen der Diplomarbeit und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre im „Diplomandenzimmer“, diesen und allen anderen DiplomandInnen und DoktorandInnen des AWI-Potsdam, vor allem Lars, Susi, Torsten und Moritz, für den abendlichen Ausgleich zur konzentrierten Arbeit,

allen anderen „AWIlerInnen“, die mir die Zeit am Institut sehr angenehm gemacht haben,

nicht zuletzt allen Freunden sowie meiner Familie, die mir immer Rückhalt und Motivation gaben und in erster Linie meinen tollen Eltern, die das Studium ermöglichten, am Fortgang der Arbeit interessiert und immer liebevolle Unterstützung für mich waren.