

Universität Potsdam
Institut für Geographie
Fachgruppe Geoinformatik

Automatisierte Objektidentifikation und Visualisierung terrestrischer Oberflächenformen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
,doctor rerum naturalium' (Dr. rer. nat.)
in der Wissenschaftsdisziplin Geoinformatik
Eingereicht an der
Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam

von

Mgr. Lucia Tyrallová

Potsdam, den 3. April 2013

Dieses Werk ist unter einem Creative Commons Lizenzvertrag lizenziert:
Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0
Deutschland
Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

Online veröffentlicht auf dem
Publikationsserver der Universität Potsdam:
URL <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2014/6926/>
URN <urn:nbn:de:kobv:517-opus-69268>
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus-69268>

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser Arbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Hartmut Asche, ohne seine fachliche Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Für konstruktive Kritik und ihre Zeit danke ich allen Kolleginnen und Kollegen, die mir Hilfestellung gegeben haben.

Kurzfassung

Die automatisierte Objektidentifikation stellt ein modernes Werkzeug in den Geoinformationswissenschaften dar (BLASCHKE et al., 2012). Um bei thematischen Kartierungen untereinander vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, sollen aus Sicht der Geoinformatik Mittel für die Objektidentifikation eingesetzt werden. Anstelle von Feldarbeit werden deshalb in der vorliegenden Arbeit multispektrale Fernerkundungsdaten als Primärdaten verwendet. Konkrete natürliche Objekte werden GIS-gestützt und automatisiert über große Flächen und Objektdichten aus Primärdaten identifiziert und charakterisiert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine automatisierte Prozesskette zur Objektidentifikation konzipiert. Es werden neue Ansätze und Konzepte der objektbasierten Identifikation von natürlichen isolierten terrestrischen Oberflächenformen entwickelt und implementiert. Die Prozesskette basiert auf einem Konzept, das auf einem generischen Ansatz für automatisierte Objektidentifikation aufgebaut ist. Die Prozesskette kann anhand charakteristischer quantitativer Parameter angepasst und so umgesetzt werden, womit das Konzept der Objektidentifikation modular und skalierbar wird. Die modulbasierte Architektur ermöglicht den Einsatz sowohl einzelner Module als auch ihrer Kombination und möglicher Erweiterungen.

Die eingesetzte Methodik der Objektidentifikation und die daran anschließende Charakteristik der (geo)morphometrischen und morphologischen Parameter wird durch statistische Verfahren gestützt. Diese ermöglichen die Vergleichbarkeit von Objektparametern aus unterschiedlichen Stichproben. Mit Hilfe der Regressions- und Varianzanalyse werden Verhältnisse zwischen Objektparametern untersucht. Es werden funktionale Abhängigkeiten der Parameter analysiert, um die Objekte qualitativ zu beschreiben. Damit ist es möglich, automatisiert berechnete Maße und Indizes der Objekte als quantitative Daten und Informationen zu erfassen und unterschiedliche Stichproben anzuwenden.

Im Rahmen dieser Arbeit bilden Thermokarstseen die Grundlage für die Entwicklungen und als Beispiel sowie Datengrundlage für den Aufbau des Algorithmus und die Analyse. Die Geovisualisierung der multivariaten natürlichen Objekte wird für die Entwicklung eines besseren Verständnisses der räumlichen Relationen der Objekte eingesetzt. Kern der Geovisualisierung ist das Verknüpfen von Visualisierungsmethoden mit kartenähnlichen Darstellungen.

Abstract

The automated object identification represents a modern tool in geoinformatics (BLASCHKE et al., 2012). In order to achieve results in thematic mapping comparable among one another, considering geoinformatics, means of object identification should be applied. Therefore, instead of fieldwork, multispectral remote-sensing data have been used as a primary data source in this work. Specific natural objects have been GIS-based and automatically identified and characterised from the primary data over large areas and object densities.

Within this work, an automated process chain for the object identification has been developed. New approaches and concepts of object-based identification of natural isolated terrestrial landforms have been developed and implemented. The process chain is based on a concept that develops a generic approach to the automated object identification. This process chain can be customised for and applied to specific objects by settings of characteristic quantitative parameters, by which the concept of object identification becomes modular and scalable. The modul-based architecture enables use of individual moduls as well as their combinations and possible expansions.

The introduced methodology of object identification and the connected characteristics of (geo)morphometric and morphologic parameters has been supported by a static procedures. These enable the comparability of object parameters from different samples. With the help of regression and variance analysis, relations between object parameters have been explored. Functional dependencies of parameters have been analysed in order to qualitatively describe the objects. As a result, automatically computed dimensions and indices of the objects can be captured as quantitative data and informations an applied to varied samples.

Within this work the thermokarst lakes represent the basis for the process development and an example and a data basis for the design of the algorithm and analysis. The goevisualisation of multivariant natural objects has been applied to develop better understanding of their spatial relations. The essence of the geovisualisation is to link the methods of visualisation to map-like presentation.

Abstrakt

Automatizovaná identifikácia objektov je moderným nástrojom v geoinformatických vedách (BLASCHKE et al., 2012). Aby sa v porovnaní s tématickým mapovaním na základe vizuálnej identifikácie dosiahli porovnateľné výsledky v prostredí GIS, je vhodné použiť pre identifikáciu geoobjektov geoinformatické prostriedky. Namiesto zberu údajov v teréne sú v predloženej práci použité ako primárne dáta multispektrálne údaje diaľkového prieskumu Zeme. Konkrétne prirodzené geoobjekty, ktoré sa nachádzajú na veľkých plochách georeliéfu prípadne s veľkou hustotou, sú automatizovane identifikované a následne charakterizované z primárnych dát v GIS-prostredí.

V rámci tejto práce je vyvinutý automatizovaný workflow identifikácie geoobjektov – prvkov krajiny. Nové koncepty a prístupy objektovo orientovanej identifikácie prírodných izolovaných terestrických foriem georeliéfu sú v práci vyvinuté a implementované. Workflow je založený na koncepte, ktorý je vyvinutý ako generický prístup pre automatizovanú identifikáciu objektov. Na základe charakteristických kvantitatívnych parametrov je možné systém procesov modifikovať a implementovať. Koncept identifikácie geoobjektov je modulárny a stupňovateľný. Modulárna architektúra umožňuje použitie ako jednotlivých modulov, tak i ich kombinácie a možné rozšírenia.

Použitá metodika identifikácie geoobjektov a následná charakterizácia ich (geo)morfometrických a morfologických parametrov je podporovaná štatistickými metódami. Tieto umožňujú porovnateľnosť objektových parametrov objektov z rôznych geografických oblastí. Výskum relácií medzi parametrami objektov je založený na regresnej a variančnej analýze. Pre kvalitatívnu charakterizáciu objektov sú analyzované funkčné závislosti parametrov. Tak je možné identifikovať automaticky vypočítané hodnoty a indexy objektov ako kvantitatívne dáta a informácie z rôznych testovacích dát.

Termokrasové jazerá sú v práci použité ako príklad pre stavbu algoritmu a následnú analýzu. Slúžia aj ako dátový testovací fundament. Pre lepšie pochopenie priestorových relácií systémových prvkov je použitá geovizualizácia multivariátnych prírodných geoobjektov. Jadrom geovizualizácie je prepojenie vizualizačných metód so zobrazovacími mapovými prostriedkami.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	ii
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	iv
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung.....	3
1.3 Kapitelvorstellung und Gliederung.....	4
2 Grundlagen der Objektidentifikation und Geovisualisierung	6
2.1 Grundlagen der Objektidentifikation.....	9
2.2 Grundlagen der Geovisualisierung.....	12
3 Identifikation natürlicher Oberflächenformen.....	15
3.1 Konzeptionelle Ebene automatisierter Objektidentifikation.....	15
3.2 Auswahl von Objekten für Objektidentifikation (Kriterien, Strategie).....	18
3.3 Objektkatalog.....	19
3.4 Thermokarst, Thermokarstseen.....	23
3.5 Regionen Nord Kanada, Sibirien.....	24
3.6 Daten.....	26
4 Implementierung des Konzeptes.....	28
4.1 Implementierte Werkzeuge.....	28
4.2 Zusammenfassung.....	36
5 Explorative Datenanalyse.....	37
5.1 Regressionsanalyse.....	37
5.2 Unterschiede in der Lage der Daten mit Varianzanalysen.....	42
5.3 Zusammenfassung.....	45
6 Geovisualisierung.....	48
6.1 Geovisualisierung multivariater natürlicher Objekte.....	48
6.2 Zusammenfassung.....	54
7 Ergebnisse.....	55
8 Diskussion und Ausblick.....	59
Quellenverzeichnis.....	62
Datenträger.....	69

Abkürzungsverzeichnis

AOI	Automatisierte Objektidentifikation
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGM	Digitales Geländemodell
ESA DUE	European Space Agency Data User Element
GIS	Geo-Informationssystem
Q-Q-Plot	Quantil-Quantil-Plot
Landsat ETM+	Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus
Landsat MSS	Landsat Multispectral Scanner
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SAR	Synthetic Aperture Radar

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Die Kartenübersicht geomorphologischer Karten GMK 100 (1:100.000) und GMK 25 (1:25.000) in der BRD.....	8
Abb. 2-2:	Die Visualisierungs-Pipeline.....	14
Abb. 3-1:	Prozesskette der automatisierten Objektidentifikation.....	17
Abb. 3-2:	Konzept des Objektkatalogs mit Objektattributen.....	20
Abb. 3-3:	Thermokartseen als Beispiel in Russland.....	23
Abb. 3-4:	Lage der Untersuchungsgebiete in Nord Kanada und Nord Sibirien.....	25
Abb. 3-5:	Beispiel von Form – und Verteilungsveränderungen von mit Wasser gefüllten Thermokarstsenken.....	26
Abb. 3-6:	Thermokarstseen in Nord Kanada.....	27
Abb. 4-1:	Pyramide der implementierten Werkzeuge.....	29
Abb. 4-2:	Werkzeug Axis+.....	30
Abb. 4-3:	Werkzeug Ellipsenkonstruktion.....	31
Abb. 4-4:	Werkzeug Elliptisches Fitting.....	32
Abb. 4-5:	Orientierung der Ellipse und der identifizierten Objekte.....	33
Abb. 4-6:	Berechnung des Winkels einer Ellipse.....	33
Abb. 4-7:	Liniensegmentparameter des Objektes.....	35
Abb. 5-1:	Der QQ-Plot der Variablen Fläche (oben) und des Umfangs (unten) der Thermokarstseen Gruppe A verglichen mit der Normalverteilung.....	39
Abb. 5-2:	Nicht-lineare Regression mit den Parametern Umfang und Fläche der kanadischen Thermokarstseen.....	40
Abb. 5-3:	: Nicht-lineare Regression mit den Parametern Umfang und Fläche der untersuchten Objekte in Sibirien.....	43
Abb. 5-4:	Der Box-and-Whisker-Plot des shape index der kanadischen und sibirischen Thermokarstseen.....	44
Abb. 6-1:	Räumliche Relationen der Objektattribute und der Objekte, Sterndiagramm verlinkt mit einer kartenähnlichen Darstellung.....	52
Abb. 6-2:	Paralleldarstellung der Wasserkörper (b, d) und Geovisualisierung deren Parameter (a, c).....	53
Abb. 7-1:	(1) Bilddaten nach der Vorverarbeitung; (2)Ausgangsdaten räumlicher Analysen, (3)positiv identifizierte Objekte.....	56
Abb. 7-2:	Ergebnisse des AOI Prozesses -Thermokarstseen – Ausschnitt: Testgebiet in Kanada.....	57
Abb. 7-3:	Vektorbasierte Abgrenzung der identifizierten Thermokarstseen.....	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Objektkatalog und signifikante Objektattribute für Thermokarstseen.....	22
Tab. 5-1: Variation zwischen kanadischen und sibirischen Thermokarstseen.....	45

1 Einleitung

Eines der Schwerpunktprogramme der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG war die "Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland" (GMK.digital, 2007). Die Kartierung hat nicht flächendeckend stattgefunden, sie wurde 1986 mit insgesamt 35 thematischen Karten abgeschlossen. In der Deutschen Demokratischen Republik wurden Methoden Geomorphologischer Kartierungen seit den Sechzigerjahren erforscht, die internationale Kommission für geomorphologische Forschung und Kartierung hat das „Handbuch der geomorphologischen Detailkartierung“ entwickelt und publiziert (DEMEK et al., 1976).

Nachteile der geomorphologischen großmaßstäblichen Kartierung können leicht große Informationsdichte und der Fokus aufs Detail sein. Der Nutzer einer solchen Karte kann leicht mit der Informationsdichte daher überfordert sein, da eine angemessene thematische Generalisierung häufig nicht stattfindet.

Oberflächenformen werden hauptsächlich durch Kartierung identifiziert. Entweder erfolgt die Kartierung im Gelände oder auf der Basis digitaler Geländedaten. Fachwissenschaftler nutzen bei der Kartierung ihr jeweiliges Fachwissen und ihre Erfahrung. Die Ergebnisse sind dementsprechend subjektiv geprägt und variieren von Kartierer zu Kartierer und für flächenhaft große Gebiete oder eine große Anzahl an Objekten ist die Individualkartierung jedoch meist zu zeit- und kostenintensiv.

1.1 Motivation

Objekte automatisiert zu identifizieren und das Gewinnen zusätzlicher Informationen über diese Objekte auch bei großen Flächen zu ermöglichen soll als objektiv geprägte Ansicht für die Kartierung von Oberflächenformen dienen. Relevante Ergebnisse können danach über andere Datenerhebungen (in situ oder fernerkundlich) verifiziert werden.

Um mit einer Kartierung vergleichbare Ergebnisse auch über verschiedene Regionen hinaus zu erzielen, sollen aus Sicht der Geoinformatik innovative Mittel für die Objektidentifikation eingesetzt werden. Anstelle von Feldarbeit werden

deshalb in der vorliegenden Arbeit Fernerkundungsdaten als Primärdaten verwendet. Die eingesetzte Methodik der Objektidentifikation und die daran anschließende Charakteristik der (geo)morphometrischen und morphologischen Parameter wird durch statistische Verfahren unterstützt. Diese ermöglichen die Vergleichbarkeit von Objektparametern. Anwendbar sind vorrangig Regressions- und Varianzanalysen. Damit wird ermöglicht, automatisiert berechnete Maße und Indizes der Objekte als quantitative Daten und Informationen zu fassen. Quantitative Aussagen können auf diese Weise über gesuchte Objekte getroffen werden.

Zur Erreichung des Ziels – automatisierte Objektidentifikation - fließen Elemente der algorithmischen Geometrie „*Computational Geometry*“ in diese Arbeit. Sie werden eingesetzt, wo die Fragestellung geometrisch beschreibbar ist. Geometrische Strukturelemente- Punkte werden konkret als Schwerpunkt und Vertex verwendet. Segmente vom Schwerpunkt zu vektorbasierter Abgrenzung des untersuchten Objektes, kleine Halbachse, große Halbachse sind alles linienhafte Strukturelemente. Polygone werden als Kreise und Ellipsen eingesetzt (Klein, 2005).

Werden Objekte als mathematisch beschreibbare diskrete Parameter aufgefasst, können sie mittels Verfahren der deskriptiven und induktiven Statistik untersucht werden. Mit Hilfe der Regressions- und Varianzanalyse werden Verhältnisse zwischen Objektparametern untersucht. Es werden funktionale Abhängigkeiten der Parameter analysiert um die Objekte qualitativ zu beschreiben. Ein optimiertes Regressionsmodell kann als Indikator für den automatisierten Prozess der Objektidentifikation aufgefasst werden.

Der fernerkundungsbasierte, von berührungsfreier Erdbeobachtung ausgehende Ansatz der automatisierten Objektidentifikation isolierter Oberflächenformen ist übertragbar:

- unter Erfüllung merkmalsbestimmter Kriterien auf terrestrische Oberflächenformen in schwer zugänglichen oder großflächigen Gebieten (siehe Kapitel 3.2) und
- auf andere Planeten, bei denen die berührungsfreie Beobachtung die einzige bzw. primäre Möglichkeit zur Datenerfassung darstellt.

1.2 Zielstellung

Ziel der Arbeit ist es, konkrete natürliche Objekte GIS-gestützt und automatisiert über große Flächen und Objektdichten zu identifizieren und zu charakterisieren. Aus multispektralen Bilddaten werden (geo)morphologische Parameter abgeleitet. Es werden quantitative Maße verwendet, um einen qualitativen Sachverhalt zu beschreiben und zu analysieren, um dabei Visualisierungsmethoden mit kartenähnlichen Darstellungen zu verknüpfen.

Schwerpunkte der Arbeit sind:

- Die Detektion von Objekten über individuelle Merkmalskataloge
- Automatisierung des Verfahrens und modularer Aufbau der Komponenten um voluminöse multivariater Daten zu analysieren
- Quantitative Charakteristik dient zur Beschreibung qualitativen Sachverhalts
- Geovisualisierung multivariater natürlicher Objekte für besseres Verständnis der Objektrelationen

Detektion von Objekten:

- Zwei Schlüsselgebiete, Zwei Studiengebiete: in Nord Kanada und Sibirien
- Thermokarstseen – natürliche, isolierte Objekte, typische Strukturen für Permafrostdegradation
- Diese Methoden lassen sich auf weitere Regionen und Objekte anwenden

Die adäquate Verarbeitung, Analyse und Geovisualisierung von Massendaten und daraus abgeleiteten Informationen ist eine Herausforderung für die Geoinformatik.

Die Objektidentifikation und die weitere Analyse der (geo)morphometrischen und morphologischen Kernparameter von natürlichen Oberflächenmorphologien sind unterstützende Werkzeuge, um z. B. in der Geomorphologie typische Oberflächenformen, die an konkrete Entstehungs- bzw. Veränderungsprozesse

gekoppelt sind, zu identifizieren. Konkrete Entstehungs- bzw. Veränderungsprozesse sind wiederum an bestimmte klimatische Prozesse gekoppelt. So können charakteristische quantitative Parameter ausgewählter Oberflächenformen auch als Klimaindikatoren betrachtet werden. Die automatisierte Identifizierung von primären isolierten Oberflächenformen ermöglicht somit, Klimaindikatoren zu identifizieren und im Vergleich zu quantifizieren.

Da Oberflächenmorphologien und ihre Geomorphologie in direkter Abhängigkeit zu Entstehungsprozessen und ihren Rahmenbedingungen stehen, bilden sie wichtige und charakteristische Indikatoren rezenter und vergangener klimatischer Bedingungen (BÜDEL 1984).

Beim fernerkundungsbasierten Ansatz wird das Abbild eines Objektes untersucht und vermessen (GEOINFORMATIK LEXIKON, 2001-2012). Natürliche Oberflächenformen sind komplexe Objekte, bei denen die Komplexität des automatisierten Identifikationsverfahrens im Gegensatz zu künstlichen Objekten größer ist. Das Vorliegen homogener Datenbestände aus den vergangenen drei Jahrzehnten ermöglicht auch temporale Analysen. Als älteste multispektrale Fernerkundungsdaten werden in dieser Arbeit Landsat Multispectral Scanner (Landsat- MSS) Daten verwendet. Die Daten sind vor mehr als 30 Jahren aufgenommen worden und erfüllen geometrische und radiometrische Voraussetzungen, um mit anderen Daten verglichen werden zu können. Es werden Daten auch aus dem vorletzten Satelliten Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (Landsat ETM+) verwendet (USGS Landsat 2013). Ansätze und Konzepte für die Identifikation der Oberflächenformen, die auf einem Objektkatalog innerhalb einer proprietären GIS-Umgebung basieren, werden hier diskutiert und am Beispiel von Thermokarstseen präsentiert.

1.3 Kapitelvorstellung und Gliederung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine automatisierte Prozesskette zur Objektidentifikation entwickelt. Es werden neue Ansätze und Konzepte der objektbasierten Identifikation von natürlichen isolierten terrestrischen Oberflächenformen behandelt und implementiert. Die Prozesskette basiert auf einem Konzept, das einen generischen Ansatz für automatisierte

Objektidentifikation generiert. Die Algorithmen basieren auf der Analyse von Primärdaten und Ableitungen daraus (z.B. Objektparameter). Für den Aufbau des Algorithmus und die Analyse der Objektparameter sind in einem GIS-gestützten Kontext als Beispiel und Datengrundlage Thermokarstseen ausgewählt worden.

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Einleitung in die Problematik (Kapitel 1), die die Motivation mit der Zielstellung beinhaltet und die Kapitelgliederung erläutert. In Kapitel 2 wird der aktuelle Stand der Wissenschaften betrachtet, indem vorrangig auf Objektidentifikation und Grundlagen der Geovisualisierung eingegangen wird. Im Kapitel 3 wird neben der Identifikation natürlicher Oberflächenformen die konzeptionelle Ebene automatisierter Objektidentifikation beschrieben. Für die Objektwahl werden Kriterien definiert, die diese Objekte erfüllen müssen um eine automatisierte Objektidentifikation durchführen zu können. Das Kapitel umfasst außer der Konzeption auch die konkrete Beschreibung der beispielhaft untersuchten terrestrischen Oberflächenform mit dem Objektkatalog, der aufgrund definierter Kriterien zum Testen der Konzeption und für die Implementierungsebene genutzt wird. Darüber hinaus werden Testgebiete und Daten beschrieben. Im Kapitel 4 liegt der Fokus auf der Implementierung des Konzepts. Die modulbasierte Architektur wird dargestellt und die Werkzeuge für die informationstechnologische Umsetzung werden beschrieben. Das Kapitel 5 erläutert die explorative Datenanalyse zur Unterstützung der automatisierten Objektidentifikation. Mit Hilfe der Regressions- und Varianzanalyse werden Verhältnisse zwischen Objektparametern untersucht. In Kapitel 6 wird die Geovisualisierung der multivariaten natürlichen Objekte für ein besseres Verständnis räumlicher Relationen der Objekte untersucht. Den Abschluss bilden die Zusammenfassung von Ergebnissen der Konzeption und der Implementierung (Kapitel 7) und eine Diskussion mit einem Ausblick, der über die Grenzen dieser Arbeit hinaus führt (Kapitel 8).

2 Grundlagen der Objektidentifikation und Geovisualisierung

Ein wesentliches Ziel in der Fernerkundung ist neben der Datenerfassung und berührungslosen Erdbeobachtung die Verarbeitung von Fernerkundungsdaten und die multi- und hyperspektrale Bildanalyse und Interpretation (BILL, 2001). Da die Erfassung von Daten für die Geomorphologie nicht nur im Feld stattfindet, sondern auch indirekte Ansätze über die Fernerkundung nutzt, ist fernerkundungsgestützte Datenanalyse ein wesentlicher Aspekt zur Informationsverdichtung, welche über Verfahren der Kartierung und Bilddaten-Interpretation die Schnittstelle zwischen der Geomorphologie und Geoinformatik darstellt.

Geoinformationssysteme (GIS) dienen der Erfassung, Verwaltung, Analyse und Darstellung von raumbezogenen Daten und Geoinformationen (DE LANGE, 2002). Der Einsatz von GIS-Werkzeugen ist für die Objektidentifikation, die weitere Charakteristik der Objekte, Analyse sowie die folgende Darstellung der Daten und Informationen notwendig.

Die Methodik der automatisierten Objektidentifikation terrestrischer Oberflächenformen und Charakteristik der Objektparameter unterstützt durch Regressions- und Varianzanalysen ermöglicht Oberflächenformen zu identifizieren, mathematisch zu beschreiben und weitere Daten sowie Informationen abzuleiten.

In der Bundesrepublik Deutschland ist das Forschungsvorhaben "Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland" durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG als Schwerpunktprogramm unterstützt worden. Das Programm wurde 1986 abgeschlossen. Trotz großer Fortschritte erfolgte die Kartierung nicht flächendeckend. Es sind 35 thematische Karten mit Erläuterung entstanden. Davon sind acht im Maßstab 1:100.000 und alle anderen geomorphologischen Karten im Maßstab 1:25.000 kartiert worden (vgl. Abb. 2-1) (GMK.digital, 2007).

In der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) und der Tschechoslowakischen Sozialistischen Republik (ČSSR) wurden der Geomorphologische Formenschatz und seine Kartierung intensiv in den Sechziger- bis Achtzigerjahren des 20. Jahrhundert untersucht. Gemeinsam mit weiteren Ländern wurde die Internationale Geographische Union mit einer Kommission für

geomorphologische Forschung und Kartierung gegründet. Präsident der Kommission war Prof. Jaromír Demek aus der Tschechoslowakei. In der DDR hat er mit Prof. Hans Kugler an der Universität Halle-Wittenberg zusammengearbeitet. Er promovierte über „Das Georelief und seine kartographische Modellierung“ (DEMEK et al., 1976). Die Kommission hat das „Handbuch der geomorphologischen Detailkartierung“ erarbeitet, um eine einheitliche geomorphologische Kartierung zu ermöglichen. Der Schwerpunkt lag bei Darstellungsmitteln und deren Vereinheitlichung (DEMEK et al., 1976), d.h. die Kartierung erfolgte nicht flächendeckend, jedoch wurden Vorschläge zur Ausgestaltung geomorphologischer Kartenlegenden entwickelt und formuliert.

Der Nachteil bei den geomorphologischen Kartierungen lag im Detaillierungsgrad. Viele großmaßstäbliche geomorphologische Karten sind mit detaillierten Informationen ohne thematische Generalisierung überfrachtet. Der Nutzer einer solchen Karte ist daher leicht mit der Komplexität von Informationen überfordert.

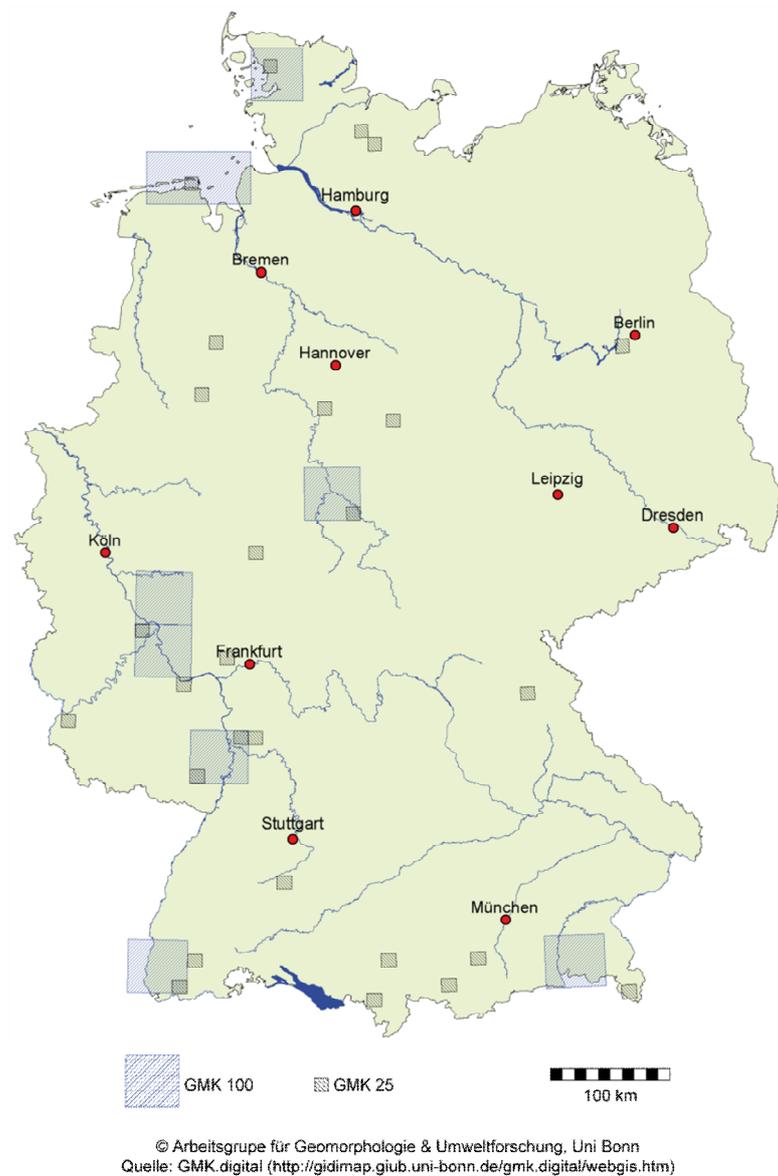


Abbildung2-1: Die Kartenübersicht geomorphologischer Karten GMK 100 (1:100.000) und GMK 25 (1:25.000) in der BRD (GMK.digital, 2007).

2.1 Grundlagen der Objektidentifikation

In einigen Wissenschaftsdisziplinen und Fachbereichen werden Primärdaten und ihre Ableitungen z. B. Höhenmodelle eingesetzt, um Objekte zu identifizieren. Die Objektidentifikationsmethoden werden zum Beispiel im Verkehrswesen, in der Stadtplanung, in der Landnutzung, im Vermessungswesen sowie im militärischen Bereich und Geomorphologie weiterentwickelt.

Unterstützend für Kartierungen werden Methoden der Objektdetektion und automatisierten Objekterkennung in der Geomorphologie umgesetzt (TYRALLOVÁ et al. 2011; HESE & GROSSE & PÖCKING 2010; TARAMELLI & MELELLI 2008; SCHNEEVOIGT et al. 2008; DRAGUT & BLASCHKE 2006; FROHN et al. 2005; HINKEL et al. 2005). Veränderungen in der Objektausprägung können auf der Grundlage von multitemporalen Fernerkundungsdatensätzen und von Höhenmodellen detektiert werden. Die Objektidentifikation und Extrahierung geomorphologischer Kernparameter schaffen automatisierte Möglichkeiten einer systematischen Ableitung quantitativer Daten und Informationen (Größe und Form der Objekte, Verbreitung der Objekte, Entfernung zu anderen Objekten). Die gewonnenen Informationen geben Aufschluss über Ausprägungen der Objektform, über räumliche Lage, Nachbarschaftsbeziehungen und Anzahl der Objekte.

Geomorphologische Oberflächenformen sind komplexe Features, die in der Regel eine Momentaufnahme in der Landschaft darstellen und kontinuierlich durch externe Faktoren verändert werden. Die eindeutige geometrische und räumliche Abgrenzung der Features ist jedoch Bestandteil aktueller wissenschaftlicher Fragestellung.

Feldarbeiten im Gelände konzentrieren sich auf spezifische Oberflächenformen, die lokal und damit auf begrenzten Flächengrößen untersucht werden. Gegenüber direkten Messverfahren können Fernerkundungsdaten und zusätzliche Daten flächenhaft verarbeitet und analysiert werden, um Oberflächenformen automatisiert zu identifizieren. Die Identifikation der Objekte erfolgt kontinuierlich über große Regionen und über multivariate Daten. Objektorientierte Bildverarbeitungsverfahren werden dabei eingesetzt, um manuelle Bilderinterpretation zu ersetzen. Neue Methoden richten den Fokus auf Automatisierung des Identifikations- und Interpretationsprozesses, um die Verfahren zeit- und personaleffizienter als die manuelle Identifikation zu

gestalten. Objektorientierte Klassifikationsverfahren haben sich das menschliche Augen-Gehirn-Prinzip angeeignet. Das Gehirn und die Augen des Menschen nehmen die Umgebung und auch Oberflächenformen als ein Objektsystem wahr (HUNZIKER 2006). Dabei wird ein System von Pixeln in ein Objekt-Segmentsystem transformiert. Die Klassifizierung definiert BROWN (1998) als eine Form der Attributgeneralisierung, bei der variable Erscheinungen zu Klassen und Typen kombiniert werden.

Die Ansätze und Automatisierungsbemühungen existieren nicht nur in der objektorientierten Klassifikation sondern auch bei Detektions-, Analyse- und Präsentationprozessen. Die Qualität der Ergebnisse aus automatisierten Prozessen ist mit visueller Interpretation und manueller Detektion vergleichbar.

Forschungsprojekte und wissenschaftliche Arbeiten mit dem Schwerpunkt der Objektidentifikation können grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilt werden. In der ersten Kategorie beschäftigt sich eine kleinere Gruppe von Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit der Detektion und Charakteristik aller auftretender Oberflächenmorphologien. Das Relief wird in kleinere geomorphologische Einheiten fragmentiert und alle Formen werden gleichzeitig auf einer theoretischen Ebene behandelt. MINÁR und EVANS (2008) zerlegen das Georelief in elementare Einheiten. Das Georelief wird als System betrachtet, in dem alle Systemelemente möglichst homogene Georeliefformen mit ihren Eigenschaften, wie Höhe und Reliefableitungen bilden. Elementformen, die im Rahmen dieser Arbeit definiert sind, werden in der Forschung als theoretische Ausgangsbasis verwendet.

Zahlreiche Untersuchungen befassen sich mit einzelnen konkreten Oberflächenmorphologien und ihrer Charakteristik. In der zweiten Kategorie werden hauptsächlich glaziale und fluviale Formen untersucht. Konkret haben ihren Platz in dieser Aufteilung Forschungsprojekte von SCHNEEVOIGT et al. (2008 und 2011), EISANK et al. (2010), HESE (2010) und TARAMELLI & MELELLI (2008). Im Testgebiet Zugspitze liegt der Fokus auf der Identifikation von Oberflächenmorphologien in alpinen Bereich. Es werden digitale Geländemodelle (DGM) und ASTER-Daten eingesetzt (SCHNEEVOIGT et al. 2008). Beispielsweise wird daran gearbeitet, glaziale Kare auf der Basis von DGM-Daten zu detektieren. Für die Segmentierung und objektbasierte Klassifikation der glazialen Formen

werden als zusätzliche Daten Krümmungsparameter verwendet. In den Klassifikationsbaum werden Nachbarschaftsbeziehungen und Form der Segmente einbezogen (EISANK et al 2010).

Die Klassifikation der Objekte mit automatisierten Methoden ist ein Schwerpunkt weiterer Arbeiten (MOORE et al., 2003; DRAGUT & BLASCHKE, 2006; NEUBERT, 2006; DRAGUT et al., 2010; HESE, 2010). Beispielsweise werden Schuttkegel mit Hilfe von Fuzzy-Logic Analysen und dem Einsatz von Parametern zur Rauheit auf der Basis von Radardaten über SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 2000) und satellitengestützten SAR-Systeme (Synthetic Aperture Radar), hauptsächlich im C-Band, identifiziert (TARAMELLI & MELELLI, 2008). Andere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit objektbasierter Klassifikation der Reliefelemente (DRAGUT & BLASCHKE 2006). DGMs werden als Primärdaten verwendet, für die Segmentierung und die darauffolgende Klassifikation werden Höhenattribute und Höhenableitungen verwendet (DRAGUT & BLASCHKE 2006).

Einige Forschungseinrichtungen untersuchen im gemeinsamen Forschungsprojekt ESA DUE (ESA Data User Element (DUE) Permafrost Projekt) Permafrost und seine Dynamik (ESA DUE 2010). Auch die Thermokarstdynamik wird erforscht, wobei Thermokarstsenken und deren strukturelle Veränderungen über 40 Jahre einen Schwerpunkt bilden. Die Ermittlung basiert auf panchromatischen Daten von KH-9 HEXAGON (optischer Spionagesatellit, 1971-1986). Bei dem Sensor wurden die Aufnahmen auf einem Film gespeichert. Diese Plattform verursacht radiometrische und geometrische Abweichungen mit sich, die sich größtenteils korrigieren lassen (HESE, 2010).

FROHN et al. (2005) haben sich mit Klassifizierung von Thermokarstbecken und Seen in Alaska auf der Grundlage von Satellitenbildern beschäftigt. HINKEL et al. (2005) verwendet folglich objektorientierte Klassifikation und räumliche Analyse, um Thermokarstbecken und Thermokarstseen in der westlichen Polarküstenebene, in Alaska differenzieren zu können. Sie wählten drei Teilbereiche in Alaska, wo sie räumliche Analyse auf beiden genannten Formen gegenseitig anwenden. Um diese vielfältigen Formen zu definieren, wurde neben anderen Ansätzen auch der Index der Form verwendet.

Um eine automatisierte Identifikation isolierter Oberflächenformen zu ermöglichen, ist es wichtig, einen Objektkatalog aufzustellen, der aus 2D sowie

2,5D Objektattributen besteht. Die Detektions- und Identifikationsalgorithmen sollen auf diesen Katalog zurückgreifen können. Ausgewählte Oberflächenformen werden dadurch mathematisch und qualitativ beschrieben und die Auswahlkriterien für einen Entscheidungsbaum abgestimmt.

Das Vorhaben in dieser Arbeit ist es, in einem eigenen Objektkatalog auch diese Attribute der Oberflächenformen zu berücksichtigen und geeignet einzubinden, wie z. B. Vertikalwölbung, die im Rahmen von Dünenuntersuchungen ermittelt wurden, um die Dynamik zu verfolgen (MITASOVA et al. 2005). In vorliegender Arbeit werden quantitative Maße verwendet, wie in der Arbeit von HINKEL et al. (2005), und erweitert um weitere Indizes und Charakterisierungen, um das qualitative Objekt geeignet zu beschreiben.

2.2 Grundlagen der Geovisualisierung

Die wissenschaftliche Visualisierung als ein interdisziplinäres Forschungsfeld bietet eine breite Palette von Methoden und Techniken zur effizienten Analyse und Visualisierung räumlicher und zeitlicher Daten und Informationen. In dieser Arbeit wird eine Disziplin der wissenschaftlichen Visualisierung benötigt, um Informationen aus Geodaten zu extrahieren und daraus Wissen aus Geodaten abzuleiten: **die Geovisualisierung**.

Dieses Forschungsgebiet bietet Werkzeuge und Techniken, um Beziehungen, Cluster und Trends in Geodaten zu identifizieren. Eine Anpassung der Methoden aus der Informatik und geographische Kenntnisse ermöglichen, räumliche und raumzeitliche Datenmuster und Informationen in verschiedenen Arten von Diagrammen und Plots zu visualisieren und mit kartographischen Elementen zu kombinieren (SCHUMANN, 2000).

Hamilton in PERKINS (2010) schätzt ab, dass bis zu 95% aller Daten einen Raumbezug besitzen. Nach Zweck und Zielgruppe der Anwender sind für alle diese Daten folgende Gesichtspunkte wesentlich, um die Ziele der Geovisualisierung zu erreichen:

- Datenvorbereitung für eine Datenbank
- Datenaufbereitung

- Nutzung der Daten und Informationen mit maximalem Informations- und Wissensgewinn

Wesentliches Mittel der Aufbereitung von Rauminformationen ist die Visualisierungs-Pipeline. Die Pipeline wird als dreistufiger Prozess betrachtet (vgl. Abb. 2-2), aus welchem ersichtlich ist, dass Datensicht und Informationsvisualisierung zusammenhängen. Sie sollten jedoch als einzelne Einheiten zu verstehen sein (KREITEL, 2008). Dieser Prozess ist in Abbildung 2-2 dargestellt, wo die Daten das Ausgangsmaterial darstellen. Große Datenmengen werden automatisch ausgewertet und die möglichen und notwendigen ersten Analysen können in Form von einer Datensicht visualisiert werden. Die Datensicht wird in der Regel durch ein Diagramm, eine Übersichtskarte oder durch eine erste Vorschau auf eine Karte vorgenommen. Die aus den Analysen und ersten Darstellungen gewonnenen Ergebnisse bilden eine Grundlage für explorative Analysen. Das sind sowohl komplexe statistische Verfahren, wie die Regressionsanalyse, Zeitreihen-Analysen und Tests auf räumliche Zusammenhänge, als auch Cluster-Analysen in Bezug auf das zentrales Raum-Zeit Problem. Im Anschluss an die Analyse der Ergebnisse werden bekannte Visualisierungstechniken verwendet und angepasst um eine Informationsvisualisierung zu erreichen. Sie können separat analysiert werden oder miteinander über interaktive Verknüpfungen verbunden werden. So erhält man Zugriff auf multidimensionale Informationen und deren Nutzung sowie deren Kommunikation. Die Komplexität der Informationen nimmt von einfachen zu komplexen Diagrammen und mehrschichtigen Karten zu. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Überprüfung der kognitiven Fähigkeiten des Nutzers und der Benutzerfreundlichkeit der Visualisierung in der Praxis. So kann die geistige Kombination von analytischen und visuellen Ergebnissen erweitert um die individuellen Kenntnisse (vorhandenes Wissen und Fähigkeiten des Nutzers) zu einem tieferen Verständnis der spezifischen Aufgabe und ihrer möglichen Relationen führen (KREITEL, 2008).

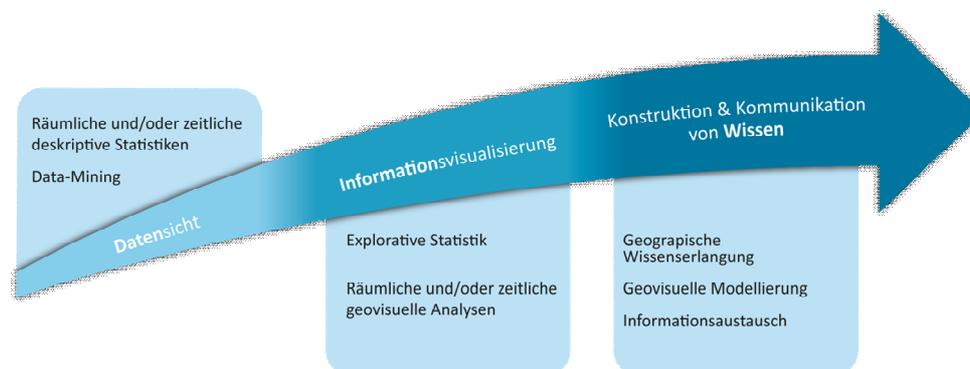


Abbildung 2-2: Die Visualisierungs-Pipeline (modifiziert nach GONSCHOREK & TYRALLOVA, 2012)

Die Visualisierungs-Pipeline stellt einen komplexen Prozess dar, der hier komprimiert präsentiert wird, um wesentliche Aspekte der Geovisualisierung zu beschreiben. Geodaten enthalten räumliche, zeitliche und sachliche Informationen und müssen für Analysezwecke aufbereitet werden. Die Datenqualität und Vollständigkeit muss geprüft werden um für die Analyse vorbereitet zu werden. Ein Import in ein Geoinformationssystem sieht folgendermaßen aus. Erste Analysen, z. B. deskriptive Statistiken und einfache räumlichen Analysen werden durchgeführt. Ihre Ergebnisse werden numerisch, in Form eines Diagramms, oder einer Karte ausgegeben. Diese allererste Datenvisualisierung - die so genannten Datensicht - bietet einen Einblick in die Datensätze auf eine nichtnumerische Art. Basierend auf Annahmen über eine hypothetische räumliche und / oder zeitliche Verteilung untersuchter Objekte und ihren Messungen werden geeignete Methoden zur explorativen Datenanalyse verwendet und angepasst. Dazu gehören Regressionsanalyse, Dichteschätzung, Zeitreihenanalyse, Cluster (und Hotspot-) Analyse und Weiteres. Numerische Informationen werden in (karto-) grafische Informationen (Rendering-Pipeline) umgewandelt. Diese grafischen Ergebnisse ermöglichen eine Darstellung der geovisuellen Analysen und die weitere Validierung und Erweiterung des Nutzerwissens. Das Wissen wird aufgebaut und weiter vermittelt basierend auf der Informationsvisualisierung oder auf der möglichen Kombination verschiedener Datensichten und Informationsvisualisierung. In der Arbeit werden Teilprozesse der Pipeline behandelt und innerhalb eines Beispiels diskutiert.

3 Identifikation natürlicher Oberflächenformen

In folgenden werden die Identifikation natürlicher terrestrischer Oberflächenformen und die konzeptionelle Ebene automatisierter Objektidentifikation behandelt. Für die Objektwahl werden Kriterien definiert, die diese Objekte erfüllen müssen, um automatisierte Objektidentifikationen durchführen zu können. Das Kapitel umfasst außer der Konzeption auch eine konkrete terrestrische Oberflächenform mit dem Objektkatalog, die anhand der definierten Kriterien ausgesucht worden ist, um die Konzeption zu testen und sich auf die Implementierungsebene zu begeben. Hierbei werden Testgebiete und Daten im Detail beschrieben.

3.1 Konzeptionelle Ebene automatisierter Objektidentifikation

Das Konzept der Objektidentifikation ist modular und skalierbar. Die modulbasierte Architektur ermöglicht den Einsatz sowohl einzelner Module als auch ihrer Kombination als mögliche Erweiterung.

Die Prozesskette basiert auf einem Konzept, das einen generischen Ansatz für automatisierte Objektidentifikation generiert. Die Prozesskette kann anhand ausgewählter Kriterien an konkrete Objekte angepasst und umgesetzt werden. Sie besteht aus Eingabedaten, die man als Input-Daten oder Input-Objekte (I1-I4) betrachten kann, sowie aus Prozesskomponenten und Ergebnissen (O1-O2): Output-Daten und Objekte.

Die wichtigsten Eingabedaten für die automatisierte Objektidentifikation sind Fernerkundungsdaten wie das Diagramm der in der Analyse umgesetzten Prozesskette (vgl. Abb. 3-1) zeigt, insbesondere: (I1) multispektrale Satellitenbilder z.B. vom RapidEye-System und Landsat-System, oder Luftbilder und Orthophotos. Generell können auch hochaufgelöste Daten neuerer Systeme verwendet werden, wenn die Daten zur Verfügung stehen. Konkret für periglaziale Formen mittlerer Größe (Objekte mit durchschnittlichem Durchmesser bis 300 m (FRENCH, 2007)) reichen Daten auch mit mittlerer räumlicher Auflösung. Für die Beobachtung zeitlicher Dynamik sind multitemporale Fernerkundungsdatensätze notwendig. Weitere wichtige

Eingabedaten sind digitale Geländemodelle (I2) für die Miteinbeziehung der dritten Dimension in die räumliche Analyse. Digitale Geländemodelle können stereophotogrammetrisch abgeleitet werden oder mittels Radar- und Lidardaten generiert werden. Zusätzlich können weitere Daten wie Temperatur, Niederschlag, Winddaten, und Feuchtigkeit für die Objektidentifikation verwendet werden (I3). Die Objektidentifikation kann mit einem proprietären GIS realisiert werden. Eine notwendige Voraussetzung ist die exakte Georeferenzierung der einzelnen Eingangsdaten und deren Co-Registrierung. Der wichtigste Teil der hier diskutierten Prozesskette ist das Aufstellen eines Objektkatalogs und eines definierten Entscheidungsbaums (I4), auf dem die Raumanalyse aufgebaut wird.

Der Objektkatalog wird als eine Referenz für die Objektidentifikation aufgeführt. Ausführliche Beschreibung des Objektkatalogs ist im Kapitel 3.3 zu finden. Die Ableitung der geomorphologischen Parameter aus dem digitalen Geländemodell in der Kombination mit zellbasierten Bilddatenberechnungen und objektorientierter Klassifizierung bilden den Kern der Objektidentifikation. Negative Objekte (nicht gesuchte Objekte) werden bei der Identifikation herausgefiltert. Ergebnisse der Raumanalysen (O1 in der Prozesskette) ermöglichen die Identifikation von Objekten, die isolierte Oberflächenformen darstellen. Die automatisierte Objektdetektion ist nur für ausgewählte Oberflächenformen in Testgebieten geeignet, die im Objektkatalog definiert wurden. Nach der Identifikation von Objekten erfolgt die Charakteristik der Objekte. Charakteristik der Oberflächenformen beinhaltet räumliche Verteilung und Klassifikationstyp der Objekte. Geostatistische Analysen, wie Varianzanalyse, Regressionsanalyse und nichtparametrische Tests (O2) werden als Unterstützung der automatisierten Objektidentifikation (AOI) verwendet, um Abweichungen und Verhältnisse zwischen einzelnen Features detektieren zu können. Ergebnisse der Varianz- und Regressionsanalyse haben Einfluss auf weiteren Identifikationsprozess und können zur Optimierung des AOI Prozesses führen.

In der Prozesskette der automatisierten Objektidentifikation werden I1 – I4 und O1-O2 als offene Objektkomponenten betrachtet. Die Übertragbarkeit der Prozesskette auf konkrete Objekte wird an einem Beispiel der Oberflächenformen getestet, um einen operationellen Einsatz über die konzeptionelle Ebene hinaus zu demonstrieren.

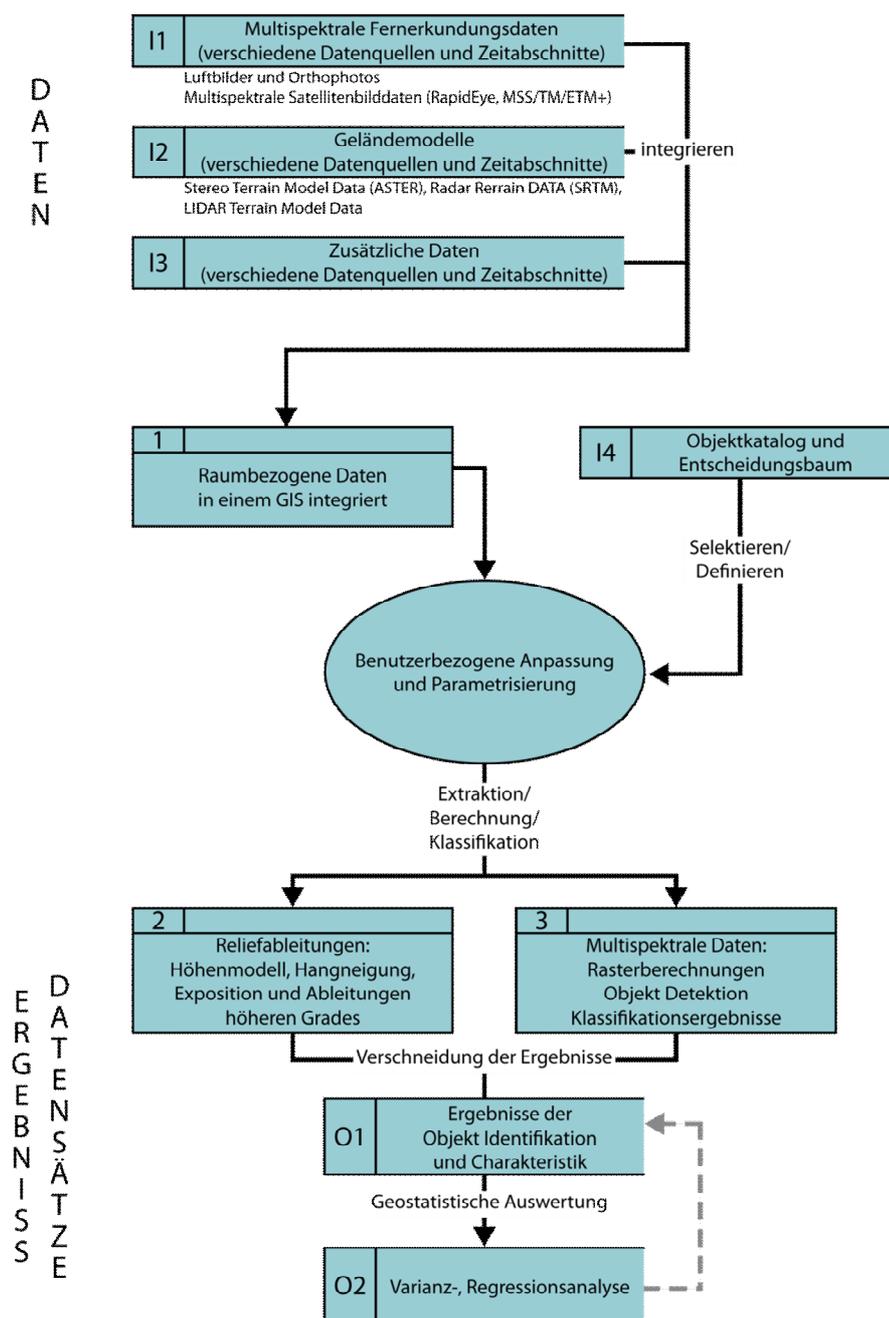


Abbildung 3-1: Prozesskette der automatisierten Objektidentifikation (modifiziert nach TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

3.2 Auswahl von Objekten für Objektidentifikation (Kriterien, Strategie)

Viele natürliche Oberflächenformen lassen sich nicht eindeutig identifizieren. Permafrostgebiete und Wüstengebiete sind kaum anthropogen übergeprägt. Um eine automatisierte Objektidentifikation aus Fernerkundungsdaten auf diese Gebiete anzuwenden, ist eine Definition von Kriterien, die auf untersuchte Objekte passen, zwingend erforderlich (Tyrillová et al. 2011):

(1) Objekte sollen als isolierte Oberflächenformen über ihre qualitativen Objekteigenschaften beschreibbar sein. Darüber hinaus sollen signifikante quantitative Beschreibungen auf der Basis von Feld- oder Primärdaten über eine statistische Funktion abbildbar sein. Unter Verwendung eines geeigneten Kriterienkatalogs und entsprechender Signifikanzkriterien sind isolierte Oberflächenformen morphometrisch definierbar.

(2) Die angemessene geometrische Auflösung der Primärdaten sowie der anderen zusätzlichen Daten ermöglicht in mehreren Testregionen die Oberflächenformen eindeutig zu identifizieren. Auf extrahierte Eigenschaften lassen sich statistische Methoden anwenden, um Ähnlichkeiten und Verhältnisse zwischen einzelnen Variablen abzuleiten und anschließend zu modellieren.

(3) Bestimmte Oberflächenformen können als primäre und eindeutige Klimaindikatoren dienen, obwohl Formen aus verschiedenen interagierenden Prozesssystemen nicht in Betracht gezogen werden können.

Objektidentifikation und die weitere Analyse der (geo)morphometrischen Parameter von natürlichen Objekten sind unterstützende Werkzeuge zur Identifikation von typischen Oberflächenformen, die eine Kopplung an konkrete Entstehungs- bzw. Veränderungsprozesse haben. Diese Prozesse sind wiederum mit bestimmten klimatischen Prozessen verbunden. So können ausgewählte Oberflächenformen auch als Klimaindikatoren betrachtet werden. Die automatisierte Identifikation von primären isolierten Oberflächenformen ermöglicht somit, Klimaindikatoren zu identifizieren und zu quantifizieren.

Oberflächenformen und ihre (geo)morphometrischen Parameter stehen in direkter Abhängigkeit zu Entstehungsprozessen und ihren Rahmenbedingungen,

sie bilden wichtige und charakteristische Indikatoren rezenter und vergangener klimatischer Bedingungen (BÜDEL, 1984).

(4) Für eine signifikante statistische Basis wird das Vorhandensein von charakteristischen Objekten in ausreichender Anzahl (auf der Erdoberfläche) benötigt.

(5) Für die Anpassung der Detektionsalgorithmen an veränderliche Rahmenbedingungen müssen die ausgesuchten Oberflächenformen hinsichtlich unterschiedlicher Größenklassen und Typenausprägung variieren.

(6) Für eine Erfassung, Auswertung und geeignete Abbildung der Veränderungen sollen die Oberflächenformen anfällig auf Klimaänderungen innerhalb einer kurzen Zeitspanne mit entsprechender Form- oder Ortsänderung sensibel reagieren.

Aus einer großen Zahl an teilweise geeigneten Oberflächenformen wurde eine konkrete Oberflächenform als Beispiel und Datengrundlage für den Aufbau des Algorithmus und die Analyse ausgewählt. Es handelt sich hierbei um Thermokarstseen (vgl. Abb. 3-2 und Abb. 3-3), da diese als isolierte Oberflächenformen mit ihren Objekteigenschaften aus Primärdaten definierbar sind. Die statistische Auswertung ist möglich. Sie treten in unterschiedlichen Größen über große Flächen auf.

3.3 Objektkatalog

Der Objektkatalog (vgl. Abb. 3-2) bildet den Kern der konzeptionellen Ebene automatisierter Objektidentifikation. Die Objektkatalogarchitektur ist skalierbar. Der Katalog besteht aus mehreren Dimensionen. Auf der konzeptionellen Ebene wird der Katalog in 1D, 2D und 3D (bzw. 2,5D) gegliedert. Die Dimensionen sind in Form von Objekteigenschaften ausgeprägt. Die Eigenschaften der Objekte werden nach Wichtigkeit für den Identifikationsprozess in erste, zweite bis n -te Priorität unterteilt. Mit der ersten, der höchsten, Priorität werden Objekteigenschaften gruppiert, die für die Objektidentifikation zwingend notwendig sind. Mit der höheren Zahl sinkt die Wichtigkeit der Eigenschaften für die Identifikation.

Die Objekte werden als mathematisch beschreibbare diskrete Parameter aufgefasst. Für die eingesetzte Methodik der Objektidentifikation und die Charakteristik der Parameter sind statistische Verfahren, Spektral- und Clusteranalyse, Filterung usw. anwendbar. Die Methoden für die automatisierte Objektidentifikation werden in Kapitel 3.1. mit der Prozesskette der automatisierten Objektidentifikation (AOI) beschrieben. Damit wird ermöglicht automatisiert, berechnete Maße und Indizes der Objekte als quantitative Daten und Informationen zu fassen. Über konkrete Objekte können nachfolgend quantitative Aussagen getroffen werden.

Das Konzept des Objektkatalogs ist auf bestimmte terrestrische Oberflächenformen übertragbar. Als eindeutig identifizierbare Objekte werden terrestrische Oberflächenformen betrachtet, die für die automatisierte Objektidentifikation, die in Kapitel 3.2. definierte Kriterien erfüllen.

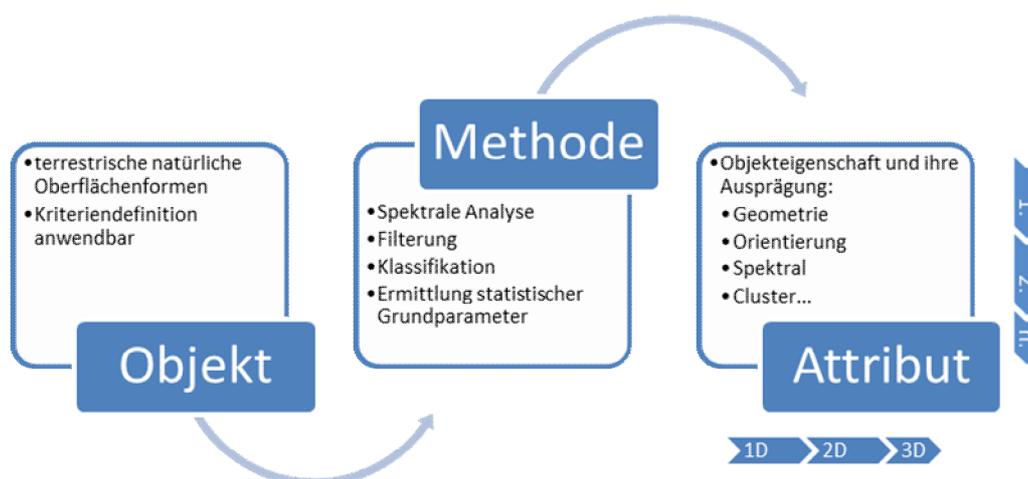


Abbildung 3-2: Konzept des Objektkatalogs mit Objektattributen

Der Objektkatalog ist eine wichtige Basis für die Werkzeugentwicklung zur automatisierten Objektidentifikation (vgl. Abb. 3-2). Er ist als Datentabelle separat aufgeführt. Die Datentabelle ist software-unabhängig (vgl. Tab. 3-1) einsetzbar und muss nicht von einem Software-Spezialisten geführt werden. Der Objektkatalog ist in Objekteigenschaften und deren Ausprägungen unterteilt. Wie das Konzept des Objektkatalogs kann auch der Objektkatalog für

Thermokarstseen als ein Beispiel für die Konkretisierung und Umsetzung des AOI-Prozesses in Dimensionen gegliedert werden. Die Objekteigenschaften und deren Attribute werden in 2D und 2,5D angeordnet. Eine andere wichtige Gruppierung der Objekteigenschaften und ihrer Attribute basiert auf der Priorität der Aufteilung für die automatisierte Objektidentifikation.

Mit der ersten, höchsten Priorität werden Objekteigenschaften sortiert, die für die Objektidentifikation zwingend notwendig sind. Mit dem Rang der Priorität sinkt die Wichtigkeit der Eigenschaften für die Identifikation. Die Gruppe zweiter Priorität umfasst hinreichende Objekteigenschaften für die AOI. Ergänzende Objekteigenschaften werden als Merkmale der dritten Priorität betrachtet sowie komplementär zu zwingend notwendigen und hinreichenden Eigenschaften verwendet, wenn vorhandene Daten zur Verfügung stehen. Für die Identifikation von Geoobjekten hat die geographische Lage des Objektes die höchste Priorität. Die Höheninformation des Objektes kann aus Höhendaten abgeleitet werden. Um die Notwendigkeit zur Transformation der Projektion bei Verwendung unterschiedlicher Datensätze zu minimieren, ist es vorteilhaft, wenn Daten in einem vergleichbaren Koordinatensystem vorliegen. Geographische Koordinaten, UTM Koordinaten oder in polaren Regionen die universale polare stereographische Projektion sind die am häufigsten verwendeten und einfach transformierbare Systeme. Mittels einfacher oder gewichteter euklidischer Distanz zu anderen Geoobjekten lassen sich Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Objekten beschreiben. Höchste Priorität für die automatisierte Objektidentifikation haben weiterhin die Form des Objektes, ihre Orientierung, Größe und konkrete Formparameter, sowie deren Relation zueinander. Diese Merkmale sind mathematisch beschreibbar und ihre Detektion automatisierbar (Tyrallová et al. 2011).

Tabelle 3-1: Objektkatalog und signifikante Objektattribute für Thermokarstseen (Tyrallová et al. 2011)

2D		2,5D	
Objekteigenschaft	Attribute	Objekteigenschaft	Attribute
1. Priorität			
Geographische Lage : (geograph. Länge und Breite)	Nordhalbkugel, (180°W-180°O, 25°N-90°N) Permafrostverbreitung (BROWN, et al, 1997)	Geographische Information über die Lage: (x, y, z)	
Nachbarschaftsbeziehungen: Euklidische Distanz zu anderen Geobjekten	Nachbarschaft zu degradiertem Permafrost Entfernung zum Meer (größere Distanz), vom Gletscher (kleinere Distanz)	Höhen für Blockgletscherverbreitung	
Klimakontext : Temperatur , Niederschlag, Temperaturschwankungen, saisonale Frostzyklen, Klimazonen	Temperatur von -12° bis +1°C (WASHBURN, 2003), Niederschlag 50 - 1250 mm (WASHBURN, 2003), Temperaturschwankungen, saisonale Frostzyklen, Klimazonen (KÖPPEN & GEIGER, 1954)		
Verteilung: Verteilungsfunktion und Objekt/Dichte	Entfernung voneinander, Clustering	Objekthöhe	
Orientierung: Elongation, Elliptizität	Thermokarst - Hauptaxe (FRENCH, 2007)	Exposition	Süden dominant
Objektform: Breite, Länge	Form: länglich, ellipsenförmig, D-Form, weich gekrümmter Rand, (FRENCH, 2007)	Neigung	bis zu 30° (hohe Neigung) (MINAR & EVANS, 2008)
Mittlere Größe: Fläche der Form	Durchmesser : 80 - 300 m (einige bis 2 km)	Horizontalwölbung	(MITASOVA et al, 2005)
Wassertiefe	Wassertiefe- flach, große Thermokarstseen - central pool 2-4m, umherum nur 0,3 - 0,5m	Vertikalwölbung	
Verhältnis einzelner Formparameter	Breite zur Länge 1:1, - 1:5, Hänge zueinander : asymmetrisch *IR/CIR		
2. Priorität			
Lockergestein	Korngröße		
Wasserinhalt	Wasser - hohe IR Absorption *IR/CIR		
Konvexität der Formen	konkav, schüsselförmig, aber asymmetrisch (AHNERT, 2003)	Hangprofil	
Reflektionsgrad in einzelnen Kanälen	höherer Reflektionsgrad in BL/GR		
Planare Symmetrie (Exposition/Insolation)	hohe Ratio IR/(BL-GR)^2 ODER geringe IR/BL-Ratio		
3. Priorität			
Wassertemperatur	in der Mitte: 3-4°C, Wasseroberfläche : -2 -3°C		
Roughness-Faktor	Wellenlängen		

Bei der Objekteigenschaft „Klimakontext“ wird die gängige und häufig verwendete Klassifikation von KÖPPEN & GEIGER (1954) verwendet, um sich auf ein System zu einigen, was die Vergleichbarkeit ermöglicht. Hinreichende Objekteigenschaften (Die Gruppe zweiter Priorität (vgl. Tab. 3-1)) sind z.B. die Bestimmung der Konvexität, und die Korngrößen des Lockergesteins. Die Unterteilung signifikanter Objektattribute in Prioritätsgruppen basiert auf dem AOI Prozess und den angewendeten Methoden.

Es empfiehlt sich stets, das gesamte Spektrum formbestimmender Faktoren über in-situ Untersuchungen zu kennen, um die Daten geeignet in den Objektkatalog einzupflegen, jedoch sind Probeentnahmen durch logistischen und finanziellen Aufwand oftmals limitiert. Teilweise können Daten mit Literaturangaben für die

konkrete Region ersetzt werden. Mit der niedrigsten, dritten Priorität sind Objekteigenschaften wie z.B. die Wassertemperatur versehen, die für die Objektidentifikation hilfreich sind. Sie sind schwer von den konventionellen Primärdaten ableitbar. Nur durch Feldproben kann man zu diesen Daten und Informationen gelangen (Tyrallová et al. 2011).

3.4 Thermokarst, Thermokarstseen

Für diese Arbeit wurden als primäre Oberflächenform Thermokarstseen ausgewählt (vgl. Abb. 3-3), da diese für ihre Dynamik bekannt sind und als Primärindikator eine wesentliche Rolle in der Erfassung des Beitrags des Klimawandels spielen. Thermokarstsenken sind Degradationsformen als Ergebnis des Abtauprozesses von Permafrost (AHNERT 2003). Die ausgewählte Oberflächenform ist durch ihre spezifischen Eigenschaften in diversen multispektralen Bilddaten (z.B. RapidEye, Landsat: MSS/TM/ETM+) identifizierbar.



Abbildung 3-3: Thermokarstseen als Beispiel in Russland (Autor: Katey Walter Anthony, University of Alaska, 2003)

Die Formen und der Prozess 'Thermokarst' stellt eine Form des Pseudokarstes dar, der durch Ausräumung von Material aus dem Untergrund mit anschließender Oberflächenabsenkung charakterisiert ist und an Permafrost gebunden ist. Durch das Auftauen des Permafrosts sind Senken häufig mit Wasser gefüllt, sie können jedoch ebenso mit der Zeit aufgrund anhaltender Permafrostdegradation austrocknen. Als typische Permafrostindikatoren reagieren sie hochsensitiv auf

Veränderung von bodennahen Temperaturen und Temperaturen im Untergrund. Geometrisch lassen sich die Formen in bildgebenden Fernerkundungsdaten als kreis- bis ellipsenförmig beschreiben. Sie treten im polaren Permafrostbereich in Gruppen und Clustern auf und sind in ihrer Längsachse meist parallel ausgerichtet. Ihr Auftreten im großen Rahmen beschränkt sich vornehmlich auf die Regionen Nordsibiriens und die nordwestlichen Polarregion Kanadas (AHNERT 2003; FRENCH 2007).

3.5 Regionen Nord Kanada, Sibirien

Permafrost unterliegt ungefähr 24 Prozent der Oberfläche der Nordhemisphäre. Sibirien ist das größte Gebiet mit kontinuierlichen Permafrost (ZHANG et al., 1999). In beiden Regionen, in Nord Kanada und Nord Sibirien (vgl. Abb. 3-4) sind Thermokarstbecken, oft mit Wasser gefüllt, sehr verbreitet. Das Untersuchungsgebiet in Nord Sibirien liegt in Lena Delta Region. Die Untersuchungsregion in Kanada ist mit Wasser im Norden und mit der Alaska-grenze im Westen abgetrennt. Die Abbildung zeigt die Verbreitung des Permafrost auf der Nordhalbkugel (NSIDC, 2013).

Typische Regionen für Thermokarstsdepressionen sind außer Kanada und Sibirien noch Alaska.

Die Regionen gehören zur polaren Tundra. In Monaten Juli und August erreicht die Lufttemperatur ihr Maximum. Die Wasseroberflächen bleiben an anderen Monaten meistens gefroren. Es handelt sich um Zone des kontinuierlichen Permafrost, die durchschnittliche Bodentemperatur liegt bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (YERSHOV, 1998; WASHBURN, 2003).



Abbildung 3-4: Lage der Untersuchungsgebiete in Nord Kanada und Nord Sibirien (rot markiert) (NSIDC, 2013)

3.6 Daten

In dieser Arbeit wurden multispektrale Fernerkundungsdaten von LANDSAT MSS und ETM+ (räumliche Auflösung 15-60 m/px) (vgl. Abb. 3-5, Abb. 3-6). Mehrere digitale Geländemodelle (DGM) wurden auf ihre Eignung für die AOI in diesen geographischen Breiten getestet. Entweder war die räumliche Geländemodellauflösung zu gering für ausgesuchte Objekte - Thermokarstseen oder das DGM (z.B. abgeleitet aus ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Daten mit der räumlichen Auflösung von 30 m/px) hatte Datenlücken. So wurde die Implementierung des AOI Konzeptes für Thermokarstseen auf die Nutzung multispektraler Satellitenbilddaten beschränkt.

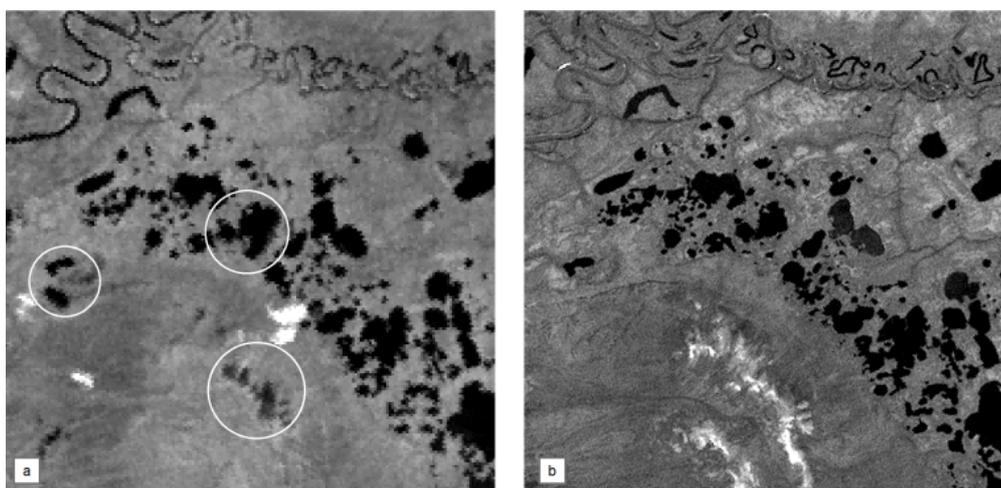


Abbildung 3-5: Beispiel von Form- und Verteilungsveränderungen von mit Wasser gefüllten Thermokarstsenken (TYRALLOVÁ et al. 2011)

[a] Zeile/Spalte 71/12, Juli 1976, Multispectral Scanner (MSS, Band 1, 60 m/px); [b] Zeile/Spalte 65/12, Juli 2002, Enhanced Thematic Mapper (ETM+ Band 1, 30 m/px); Mittelpunkt: $-139.7^{\circ}/67.8^{\circ}$.

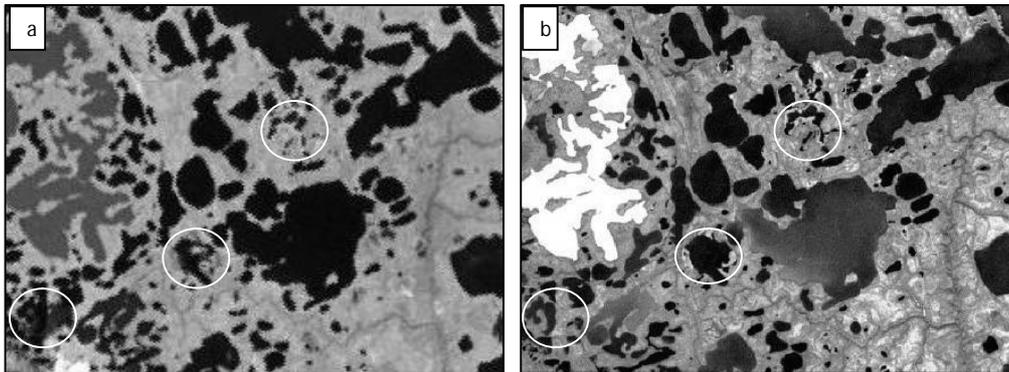


Abbildung 3-6: Thermokarstseen in Nord Kanada (TYRALLOVÁ, 2011)

[a] Zeile/Spalte 71/11, Juli 1976, Multispectral Scanner (MSS, Band 1, 60 m/px); [b] Zeile/Spalte 65/12, Juli 2000, Enhanced Thematic Mapper (ETM+ Band 1, 30 m/px); Mittelpunkt: $-139.9^{\circ}/67.9^{\circ}$

4 Implementierung des Konzeptes

Die informationstechnische Umsetzung des Konzeptes ist modular und skalierbar. Die Werkzeuge, aus denen die Module bestehen, kann man nach Softwareumgebung und Dimension skalieren. Die modulbasierte Architektur ermöglicht den Einsatz einzelner Module in unterschiedlichen Softwareumgebungen, sowie mögliche Erweiterungen. Die Dimensionen sind in den Objektkatalog und in die Charakteristik der Objekteigenschaften eingeflossen.

In diesem Kapitel werden implementierte Werkzeuge zur automatisierten Objektidentifikation vorgestellt. Die Werkzeuge werden erstellt, in ein Geoinformationssystem implementiert und ihre Funktionalität an mehreren Datensätzen getestet.

4.1 Implementierte Werkzeuge

Die Werkzeuge sind logisch in eine 3-stufige Pyramide eingeteilt (vgl. Abb. 4-1). Die erste Ebene (vgl. Abb. 4-1: 1.) besteht aus Vorverarbeitungskomponenten für den konkreten Sensor (Landsat ETM+).

Aus primären Digitalzahlen (DN), in welchen die gemessene Strahlung gespeichert ist, werden der Wert der Strahldichte (radiance, L ($W/m^2/sr/\lambda$)) für jedes Pixel in konkretem Band ausgerechnet. Die Strahldichte wird nachfolgend in den Reflexionsgrad (reflectance, ρ) konvertiert (CHANDER et al. ,2009; LANDSAT 7 HANDBOOK, 2011).

Der Reflexionsgrad ist ein Maß für die reflektierte Energiemenge von einem Bildpunkt der Oberfläche und dient so als eine wesentliche. Eigenschaften im Bild, um die Objekte zu charakterisieren (LEXIKON DER FERNERKUNDUNG, Purkis, 2012).

Die Vorverarbeitungskomponente kann vom Expertennutzer auch für andere Sensoren angepasst werden. Ein allgemeiner Nutzer kann bei anderen Daten eine andere Softwareumgebung verwenden. Die Vorverarbeitungsebene kann übersprungen werden, wenn man Daten analysiert, die bereits vorverarbeitet sind oder wenn eine andere Softwareumgebung für diesen Schritt gewählt wird. Im Zentrum der automatisierten Objektidentifikation (AOI) stehen die zweite und die

dritte Ebene. Das Pyramidenprinzip wurde gewählt, weil die einzelnen Komponenten der AOI aufeinander aufbauen. Die einzelnen Werkzeuge in der AOI werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

Der Quellcode ist im Anhang zu finden, in der Arbeit wird die Funktionalität erläutert und an Beispielen präsentiert. Die ArcGIS-Toolbox wurde um einige Skripte und Model-Builder-Werkzeuge erweitert.

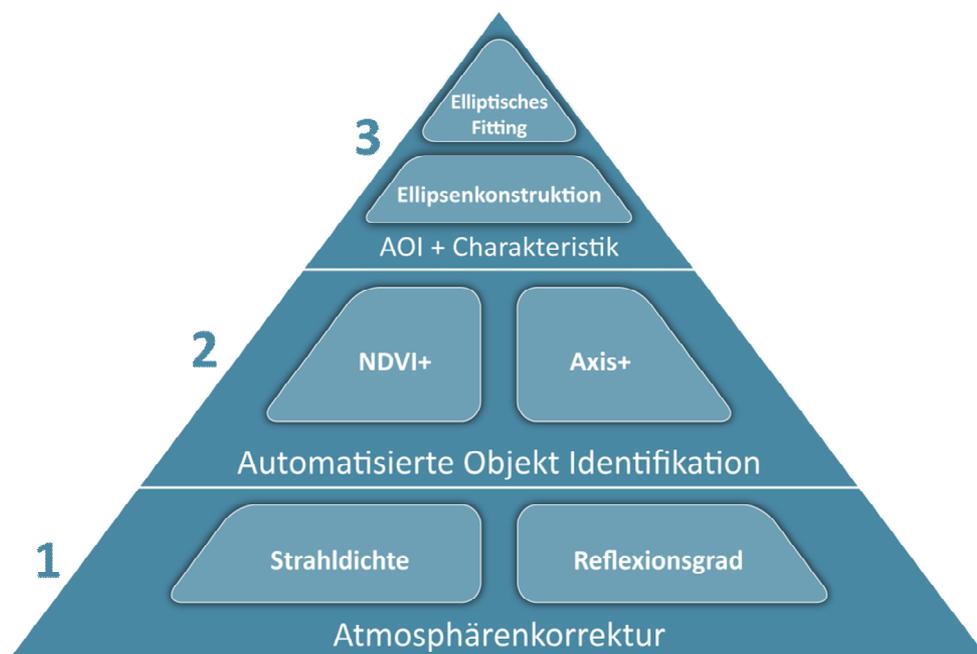


Abbildung 4-1: Pyramide der implementierten Werkzeuge

Das Modul „Axis+“ berechnet den Schwerpunkt sowie den maximalen und minimalen Abstand vom Schwerpunkt zur linienhaften Objektbegrenzung für jedes flächenhafte Objekt (Polyline-typ) (vgl. Abb.4-2). Das Skript erstellt zunächst an benutzerdefinierten Orten auf dem Dateisystem eine Polyline-Shapefile und eine Polygon-Shapefile. Die Polyline-Shapefile beinhaltet Geometrien der kleinen und der großen Halbachsen mitsamt Angaben zu dem zugrunde liegenden Polygon, der Achsenlänge und der Art der Achse (kleine oder große Halbachse). Die Halbachsen werden dabei folgendermaßen ermittelt: Für jedes Polygon wird iterativ die Entfernung von jedem Vertex zum Schwerpunkt berechnet. Ist diese Entfernung größer als die gespeicherte größte Entfernung oder kleiner als die

gespeicherte kleinste Entfernung, werden die Koordinaten von diesem Vertex gespeichert. Nachdem über alle Vertices iteriert wurde, werden anhand der gespeicherten Koordinaten für die maximale und minimale Entfernung die Halbachsen ausgehend vom Schwerpunkt konstruiert und im Polyline-Shapefile gespeichert. Das Polygon-Shapefile beinhaltet Kopien des zu prozessierenden Polygon-Shapefiles. Es werden Objektattribute Fläche, Umfang, Index der Form und Asymmetrie automatisch berechnet. Die Maße sind im Kapitel 6.1 detailliert beschrieben. Die Attribut-Berechnungen werden über das ArcToolbox-Werkzeug "Calculate Field" durchgeführt, das über ein Geoprocessing-Objekt aufgerufen wird.

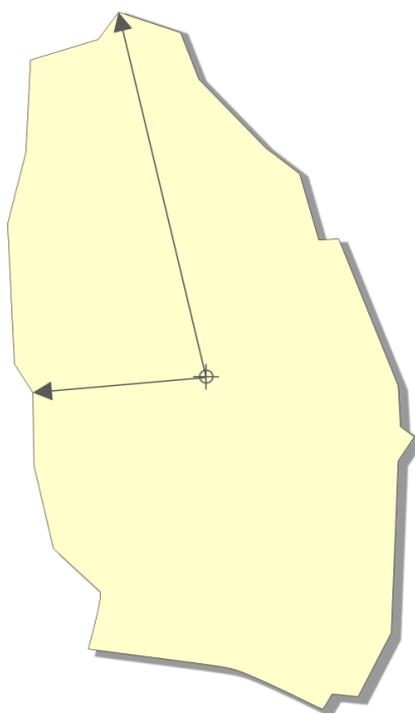


Abbildung 4-2:Werkzeug Axis+

Ein weiteres Modul „Ellipsenkonstruktion“ ermittelt elliptische Parameter eines beliebigen Polygons(vgl. Abb.4-3). Für jedes Polygon wird eine Ellipse ausgegeben und deren Geometriemaße werden berechnet: kleine und große Halbachse, Schwerpunkt und seine Koordinaten, Orientierung und weitere Maße wie Fläche,

Umfang, Stärke (der tiefste Punkt innerhalb der Zone). Damit das Problem der Eindeutigkeit von Anfang an nicht entsteht, wird auch die Abfrage nach der Spaltenbenennung der Identifikationsnummer ID eingefügt, die aus einer Attributstabelle abgelesen wird. Der Standardwert für den Detaillierungsgrad wird auf den Wert 80 eingestellt. Bei der Erprobung des Standardwerts wird die Komplexität der Strukturen und der Winkel berücksichtigt. Der Wert wird an mehreren Datensätzen getestet, auch für extreme Fälle. Den Detaillierungsgrad kann man aufwärts und abwärts skalieren. Der Wert gibt die Anzahl der Knoten an, aus denen die Ellipsengeometrie erstellt wird.

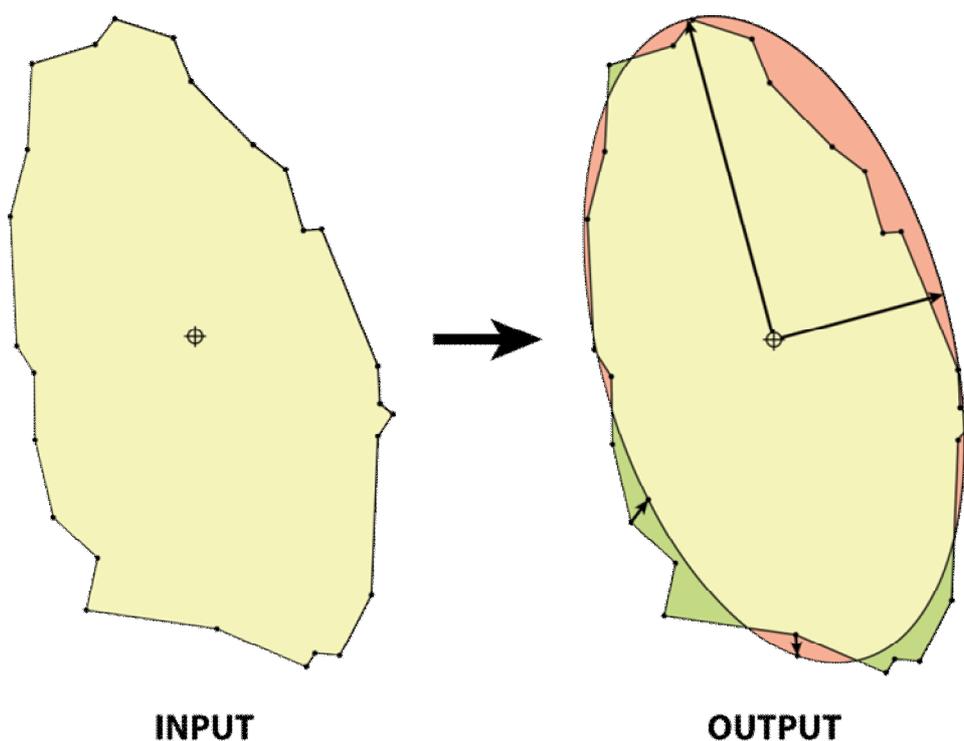


Abbildung 4-3: Werkzeug Ellipsenkonstruktion

Das Modul „Elliptisches Fitting“ berechnet Unterschiede zwischen den Objekten (Polygonen) und Ihren Ellipsen (vgl. Abb.4-4). Es wird eine Schnittmenge beider Datensätze für jedes Objekt erzeugt. Die Differenzlinien werden für jedes Objekt als ein Linien-Shapefile ausgegeben. Sie beinhalten analytische Ergebnisse pro Objekt/Linie. Der Index Elliptisches Fitting beschreibt, wie gut sich ein Objekt mit

seinen Proportionen einer Ellipse ähnelt. Die Werte bewegen sich zwischen 0 (keine Ähnlichkeit) und 1 (passt sich perfekt an).

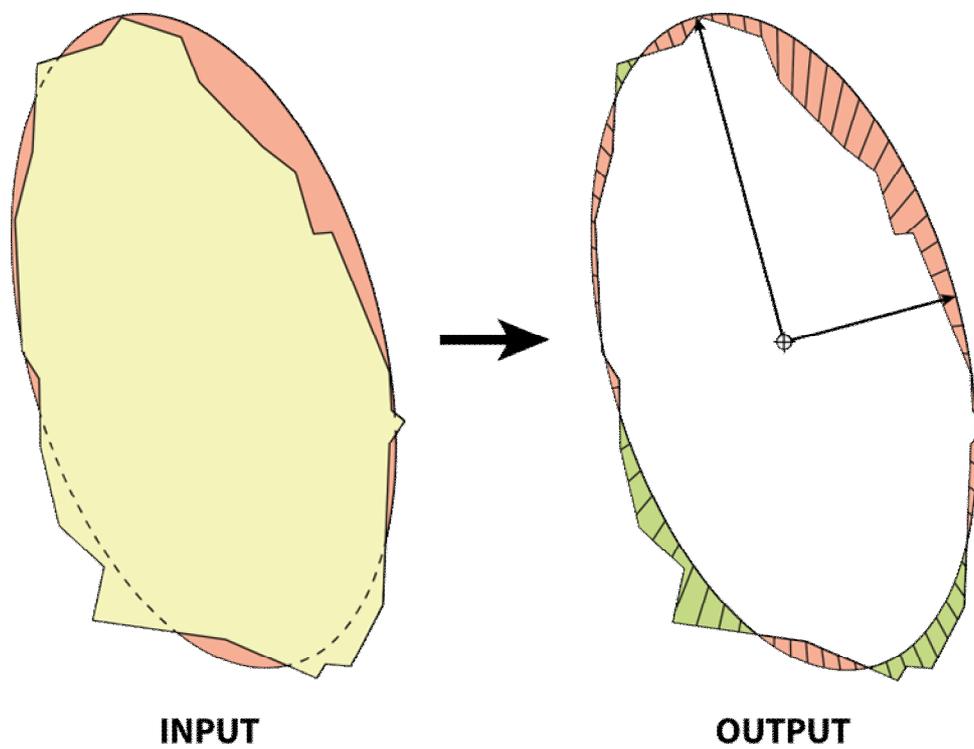


Abbildung 4-4:Werkzeug Elliptisches Fitting

Orientierung der Ellipse und der identifizierten Objekte bezieht sich auf die positive x Halbachse und verläuft gegen den Uhrzeigesinn (vgl. Abb.4-5).

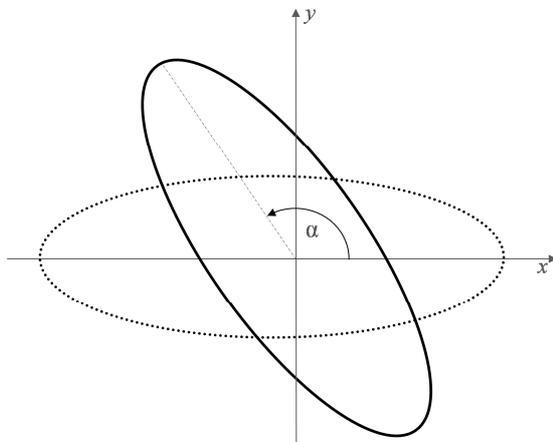


Abbildung 4-5: Orientierung der Ellipse und der identifizierten Objekte

Der Winkel φ einer Ellipse und der Abstand zwischen dem Mittelpunkt und dem Punkt P''' wurde anhand der Polarkoordinaten ermittelt (vgl. Abb. 4-6). Bekannt war der Winkel α und Punkt P'' , die Ellipse wurde als gestauchter Kreis angesehen (HAKE, 2002).

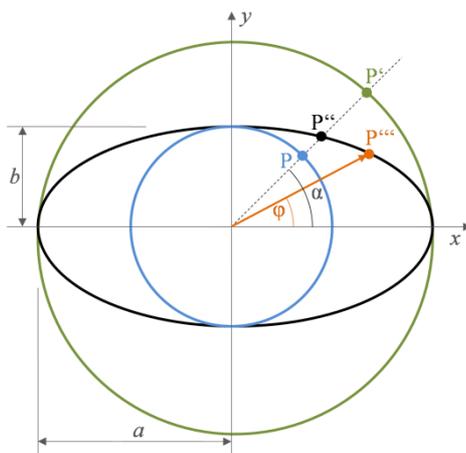


Abbildung 4-6: Berechnung des Winkels einer Ellipse (modifiziert nach HAKE, 2002)

Außerdem werden weitere Parameter pro Liniensegment des Objektes in einer neuen Textdatei ausgegeben. Es handelt sich um Identifikationsnummern: Objekt-ID und ID der einzelnen Liniensegmenten des Objektes. Wichtige ermittelte Parameter sind der Winkel zwischen dem Segment und der großen Halbachse (verläuft gegen den Uhrzeigersinn); Länge des Liniensegmentes; Radius (Segment / einzelne Segmente summiert) der Ellipse im entsprechenden Winkel (in der Attributtabelle angegebener Winkel als eine Eigenschaft) und Entfernung zwischen dem Rand der Ellipse und den nächsten Endknoten des Liniensegmentes (vgl. Abb. 4-7).

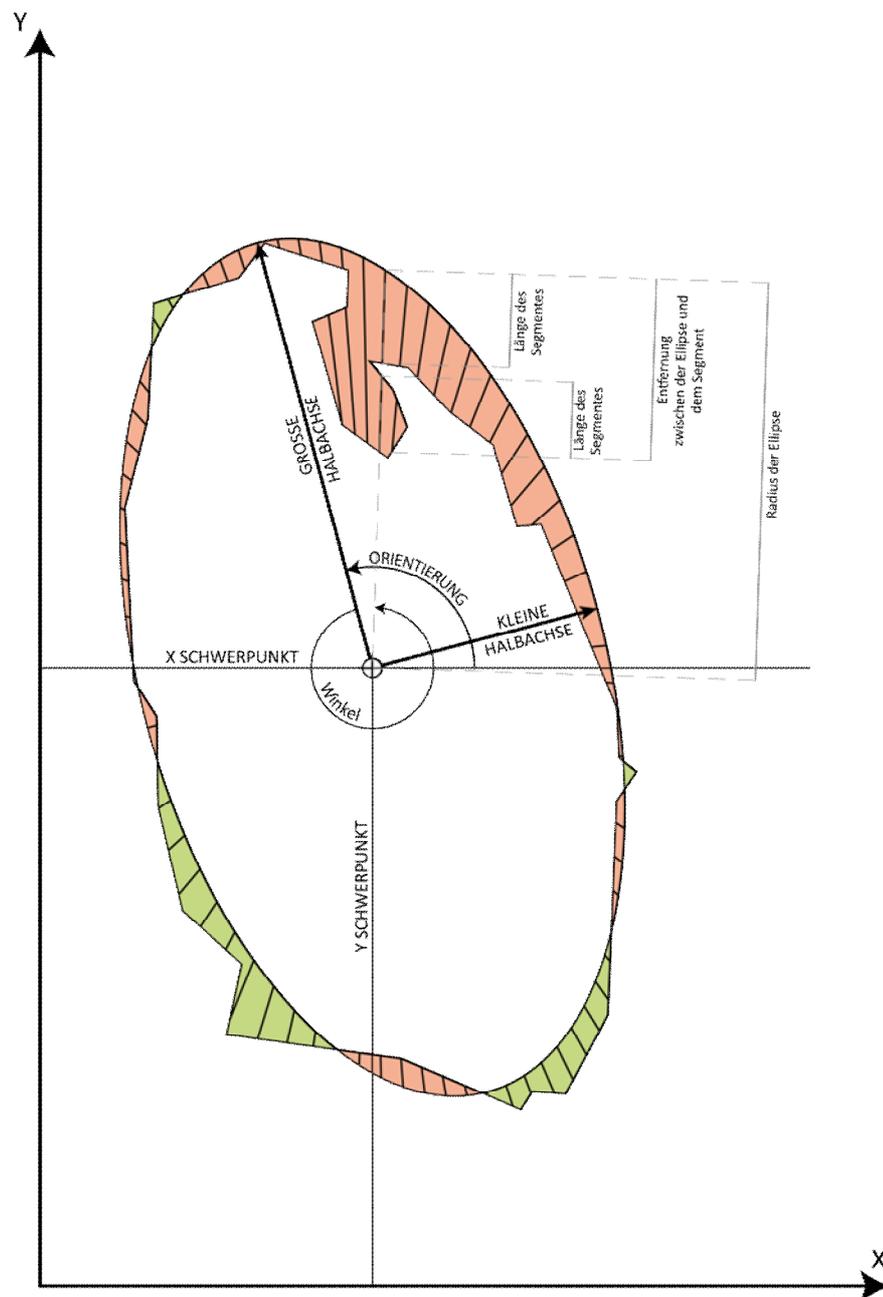


Abbildung 4-7: Liniensegmentparameter des Objektes

4.2 Zusammenfassung

Der Mehrwert der entwickelten und implementierten Werkzeuge besteht in der Verflechtung und Umsetzung konkreter, ausgewählter Fernerkundungs-, Geoinformations- und Trigonometrie-Werkzeuge. Diese Werkzeuge ermöglichen die automatisierte Identifikation von spezifischen natürlichen Objekten. Der modulare Aufbau der Architektur ermöglicht den Einsatz von ausgesuchten bzw. allen Modulen.

Die automatisierte Objektidentifikation kann eine manuelle Erfassung auf Basis einer wissens- und erfahrungsbasierten Interpretation von Oberflächenformen nicht vollständig ersetzen und ein Anspruch auf Vollständigkeit und Fehlerfreiheit kann aufgrund der Komplexität und der Vielzahl von Sonderfällen – auch bei einfachen isolierten Oberflächenformen – nicht erhoben werden. Der automatisierte Prozess kann jedoch auf der a-priori Ebene helfen, bestimmte Oberflächenformen zu erkennen, ist hinsichtlich der Effizienz der visuellen/manuellen Identifikation in der statistischen Erstabschätzung überlegen. Die Identifikation von komplexen Objekten und deren Detailkartierung müssen nach wie vor von Experten in den jeweiligen Fachdisziplinen durchgeführt werden. Die Validierung der Detektionsergebnisse steht im Vordergrund, wobei die Genauigkeit des Verfahrens visuell und statistisch bewertet werden muss.

Die Integration automatisierter Abläufe innerhalb einer GIS-Umgebung ist dabei wichtig, um innerhalb eines integrierten Systems Werkzeuge einer großen Zahl an Experten zur Verfügung zu stellen. Damit verbunden ist ein reibungsloser Daten- sowie Erfahrungsaustausch.

Die automatisierte Objektidentifikation ist zeiteffizient und stellt eine Methode zur Ableitung geomorphologischer Parameter über große Flächen und Objektdichten zur Verfügung. Bei Nutzung multitemporalen Daten steht darüber hinaus auch eine wertvolle Datenbasis zur Verfügung, um dynamische Prozesse zu erfassen und zu quantifizieren, sowie daraus Ableitungen über Einflussgrößen auf absoluter und relativer Skala zu generieren.

Es werden Java-Skripte für die automatisierte Objektidentifikation erstellt, implementiert und getestet. Ein großer Vorteil dieser Skripte ist, dass sie leicht systemunabhängig implementiert werden können.

5 Explorative Datenanalyse

Das folgende Kapitel umfasst die explorative Analyse zur Unterstützung der automatisierten Objektidentifikation.

Methoden explorativer, raumbezogener Datenanalysen werden angewendet, um zusätzliches Wissen und Informationen über konkrete Oberflächenformen zu erlangen. Damit mögliche Ähnlichkeiten, Abweichungen und Verhältnisse zwischen einzelnen Features detektiert und identifiziert werden können, werden Methoden der angewandten Mathematik eingesetzt. Es wird mit zwei Testdatensätzen gearbeitet.

Der erste Testdatensatz beinhaltet als Objekte Thermokarstseen in Kanada (konkrete geographische Beschreibung – siehe Kapitel 3.5).

Der zweite Testdatensatz mit sibirischen Thermokarstseen (konkrete geographische Beschreibung – siehe Kapitel 3.5) wird verwendet um die Ergebnisse vergleichen und funktionale Zusammenhänge einzelner Objektparametern untersuchen zu können.

5.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist eine wichtige statistische Methode, die oft in unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft (so auch in Geobereichen) eingesetzt wird, um diverse Fragen zu beantworten und Massendaten effektiv zu erforschen. Untersuchungen zu funktionalen Abhängigkeiten in komplexen Datenstrukturen sind zentraler Gegenstand der Statistik. Das Regressionsmodell soll die Realität in einem definierten Verhältnis beschreiben. Das mathematische Model umschreibt den Zusammenhang zwischen zwei (oder mehr) Variablen durch eine Funktion in einem Datensatz. Ziel der Regressionsanalyse ist es herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen den Variablen gibt und wenn ja, wie stark er ist (Sachs 2009).

Die Regressionsanalyse wird im Prozess der automatisierten Objektidentifikation eingesetzt, um funktionale Abhängigkeiten der Objektparameter zu analysieren und um die Objekte qualitativ zu beschreiben können. Ein optimiertes Regressionsmodell kann als Indikator für den AOI Prozess aufgefasst werden.

Bei den Thermokarstseen in Kanada werden diese metrische Parameter untersucht: der Umfang, die Fläche und der Radius (Differenz zwischen dem Flächenschwerpunkt und dem entferntesten Polygonknoten/Punkt).

Die Werte variieren zwischen 85 und 18,3 Meter (Umfang), die Flächenangaben von diesen Objekten liegen zwischen 307 und 11.361 Quadratmetern. Der Radius variiert zwischen 20 und 3.261 Metern. Hauptziel ist die Beantwortung der Frage, ob es einen formellen und auch einen kausalen Zusammenhang zwischen diesen Parametern gibt. Solche Charakteristik der Oberflächenformen kann bei der automatisierten regionsunabhängigen Identifikation der Objekte helfen. Automatisierte Identifikationen sind hauptsächlich für große Gebiete und Massendaten geeignet.

Für die weiteren Analysen werden die Objekte – Thermokarstseen in zwei Gruppen eingeteilt:

- Gruppe A sind alle Objekte im Testgebiet mit einer Fläche bis zu 500.000 Quadratmeter und
- Gruppe B besteht aus Objekten mit einer Fläche von 500.000 Quadratmeter und größer.

Der Trennwert 500.000 Quadratmeter der Objektfläche ist auf der Basis der statistischen Verteilung der Daten gesetzt worden. Zunächst wird eine einfache graphische Methode angewendet: der Quantil-Quantil-Plot (Q-Q-Plot). Der Q-Q-Plot ist eine visuell unterstützte Methode für das Abfragen linearer Abhängigkeiten der Attribute. Der QQ-Plot zeigt die Variablen Fläche (vgl. Abb. 5-1, oben) und Umfang (vgl. Abb. 5-1, unten) der Thermokarstseen Gruppe A verglichen mit der Normalverteilung. Aus dem Q-Q-Plot geht hervor, dass die Variablen nicht bzw. nicht annähernd normal verteilt sind. Der Q-Q-Plot (vgl. Abb. 5-1) zeigt in beiden Fällen große Abweichungen der beobachteten Werte von der transformierten Normalverteilung, die Datenpunkte sind an den Enden der Plots zerstreut. Extreme Abweichungen sind oberhalb der Verteilungsgrade einer Normalverteilung zu sehen. Bei dem Attribut Fläche der Thermokarstseen sind Abweichungen auch in den mittleren Bereichen zu sehen. Weitere Tests waren nicht erforderlich, der Q-Q-Plot war bei der untersuchten Fragestellung ausreichend unterstützend. Die Parameter der untersuchten Oberflächenform sind nicht linear abhängig.

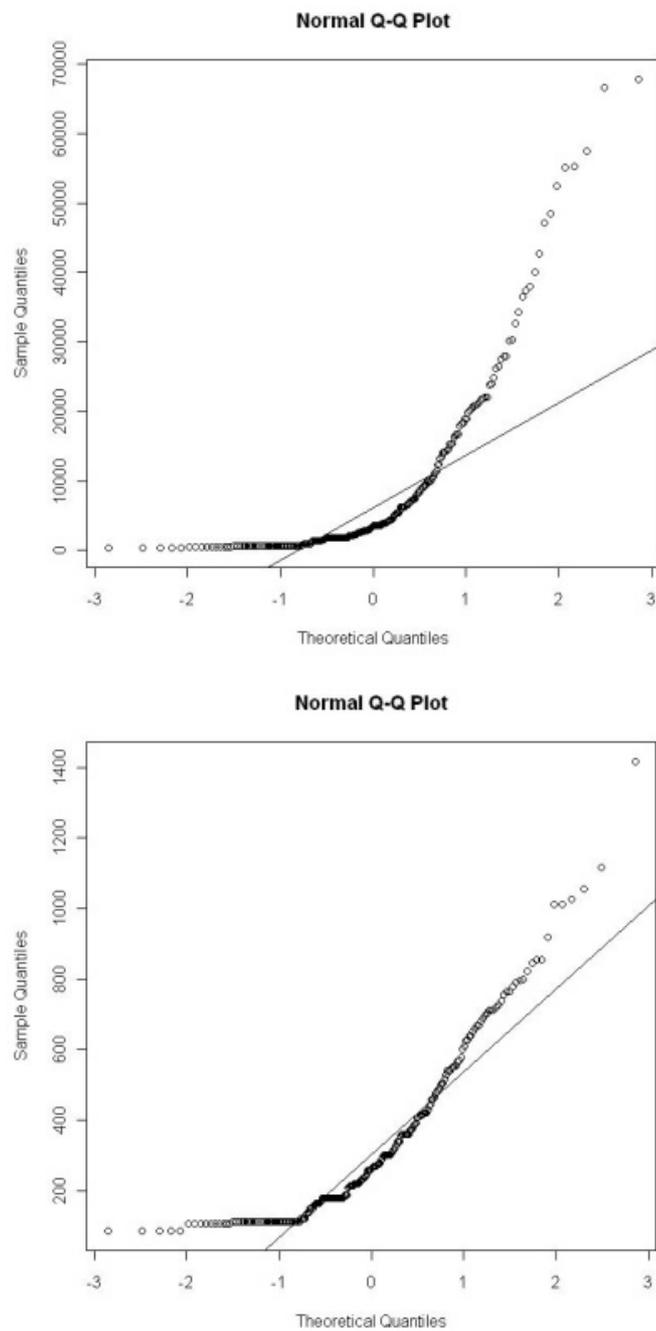


Abbildung 5-1: Der QQ-Plot der Variablen Fläche (oben) und des Umfangs (unten) der Thermokarstseen Gruppe A verglichen mit der Normalverteilung. (TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

Von den in der Abb. 5-1 dargestellten Ergebnissen ist die Notwendigkeit der Anwendung eines nicht-linearen Modells abzuleiten. Das nicht-lineare Modell wird eingesetzt, um mögliche Zusammenhänge zwischen den Parametern zu ermitteln. Die beste Approximation des Realzustandes ist mithilfe der Exponentialfunktion gegeben und berechnet. Die Funktion wurde sowohl qualitativ-visuell als beste Approximation gewählt, als auch mehrere statistische Tests wurden durchgeführt.

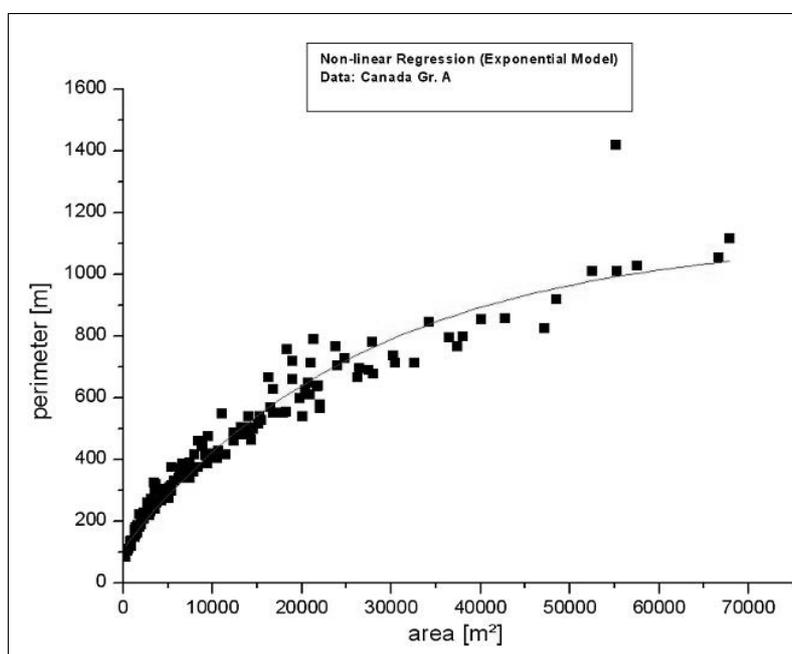


Abbildung 5-2: Nicht-lineare Regression mit den Parametern Umfang und Fläche der kanadischen Thermokarstseen (TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

Abbildung 5-2 zeigt ein Streudiagramm der beobachteten Variablen: Fläche und Umfang (schwarze Quadrate) mit der modellierten exponentiellen Regressionsfunktion (schwarze Verteilungskurve) in der Grundform (vgl. Gl. 5-1) von (Originlab 2011):

$$f(x) = y = y_0 + A \left(e^{-\frac{(x-x_0)}{\tau}} \right) \quad (5-1)$$

Mit folgenden Parametern (Gl. 5-1):

y_0 Minimum-Wert des Parameters Umfangs im Datensatz

x_0 Minimum-Wert des Parameters Fläche im Datensatz

x konkreter Wert des Parameters Fläche

A Amplitude

τ Decay Konstante (5-1)

Die Datenpunkte der beobachteten Variablen liegen nah an der modellierten Regressionsfunktion, zum rechten Ende des Diagramms steigt die Abweichung, einige Datenpunkte sind verstreut.

Kanadische Thermokarstseen in der Gruppe A sind trichterförmig verteilt. Für die Güte der Regression wurde das adjustierte Bestimmtheitsmaß r^2 berechnet. Das Bestimmtheitsmaß r^2 basiert auf der Variabilität und Fehlervarianz (Crawley 2007). Das exponentielle Regressionsmodell gibt die Beobachtungen sehr gut wieder ($r^2 = 0,91$).

Eine weitere Aufgabe ist das Testen des Regressionsmodells und die Identifikation ausgesuchter Objekte in einem anderen Raumausschnitt.

Der erwartete exponentielle Zusammenhang zwischen den Variablen Umfang und Fläche ist bestätigt. Die Variablen hängen von geometrischem Prinzip der Form zusammen. Andere Parameter wie z.B. Shape Index, Asymmetrie sowie Elliptisches Fitting werden vorgeschlagen um getestet zu werden.

5.2 Unterschiede in der Lage der Daten mit Varianzanalysen

Die Daten aus der Regressionsanalyse sind eine wichtige Komponente für die komplexe statistische Analyse, deswegen wurden sie einbezogen. Die sehr gute Anpassung der kanadischen Daten an das exponentielle Regressionsmodell führt zur Frage, ob Thermokarstseen mit unterschiedlicher geographischer Lage, wie z.B. Sibirische Thermokarstseen, ähnliche funktionale Zusammenhänge zeigen. An dieser Stelle soll deutlich gemacht werden, dass auch ein weiteres (positives) Beispiel aus einer anderen Region nicht mit einem mathematischen Beweis des Regressionsmodells für die Allgemeinheit gleichzusetzen ist. Dennoch kann die Hypothese formuliert werden, dass das Regressionsmodell ein Indikator für die automatisierte Identifikation der beschriebenen Objekte und ähnlicher Oberflächenformen sein kann. Metrische Parameter (Umfang, Fläche) der sibirischen Thermokarstseen zeigen eine ähnliche Verteilungsform wie die kanadischen (vgl. Abb. 5-2 und 5-3 Vergleich: Kanada –Gruppe A, Sibirien – Gruppe B). Es wird das gleiche exponentielle Regressionsmodell mit unterschiedlichen Koeffizienten verwendet. Während die Kanada-Gruppe-A eine trichterförmige Verteilung zeigt, veranschaulichen die sibirischen Daten eine größere Varianz mit zunehmenden Flächen. Das visuelle Ergebnis korrespondiert mit der Statistik.

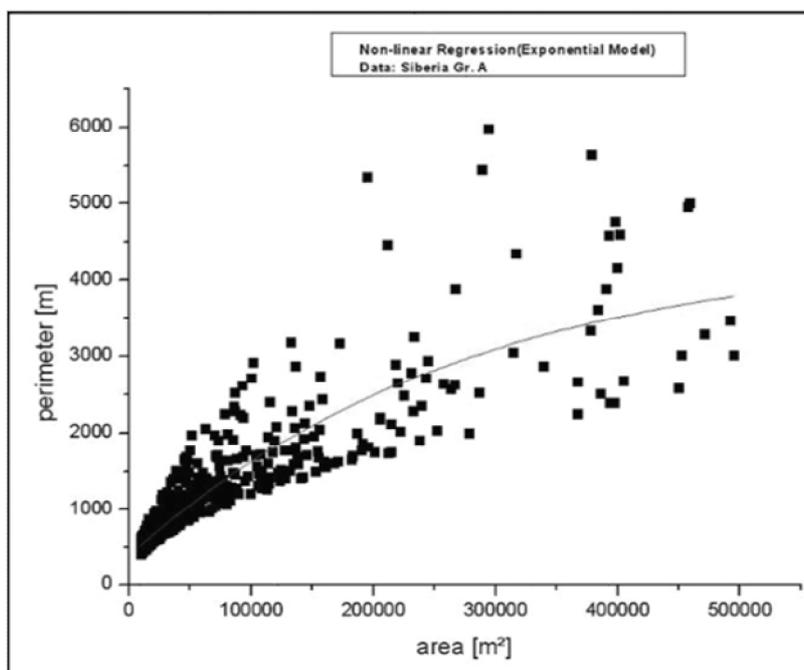


Abbildung 5-3: Nicht-lineare Regression mit den Parametern Umfang und Fläche der untersuchten Objekte in Sibirien (TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

Ein Box-and-Whisker-Plot unterstützt den visuellen Vergleich zwischen den kanadischen und sibirischen Oberflächenform-Daten hinsichtlich der Varianzunterschiede. Ein Box-and-Whisker-Plot ist eine graphische Darstellungsart des Medians, der Quartile und deren Variabilität und hilft signifikante Unterschiede zwischen den Parametern zu lokalisieren (LOZÁN & KAUSCH, 2007). Es wird ein mathematisch beschreibbares und vergleichbares Maß definiert: der "shape index (Si)", Index der Form (vgl. Gl. 5-2) berechnet und dargestellt (Hinkel et al. 2005). Um diese Objekte in einer Formel zu beschreiben, wurde der *shape index* verwendet:

$$S_i = \frac{\text{Umfang}}{4 \cdot \sqrt{\text{Fläche}}} \quad (5-2)$$

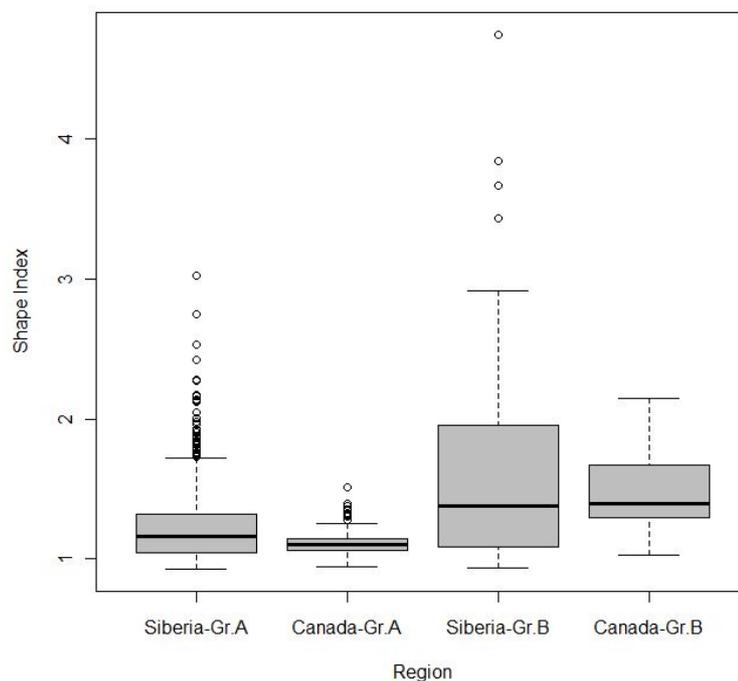


Abbildung 5-4: Der Box-and-Whisker-Plot des shape index der kanadischen und sibirischen Thermokarstseen (TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

Abbildung 5-4 zeigt den Box-and-Whisker-Plot des Parameters Form-Index der Gruppen A und B in Kanada und Sibirien. Man kann folgende Unterschiede visuell identifizieren:

- Große Variation der Position von Medianwerten und die Größe der Boxen zwischen der Gruppe A (Fläche $<500,000 \text{ m}^2$) und Gruppe B (Fläche $\geq 500,000 \text{ m}^2$) sowohl in Kanada als auch in Sibirien
- Variation der Position von Medianwerten zwischen der kanadischen Gruppe A und der sibirischen Gruppe A
- Fast identische Position / Lage des Medians zwischen der kanadischen Gruppe B und der sibirischen Gruppe B

Die Verwendung von nicht-parametrischen Tests ermöglicht eine Abfrage über Ähnlichkeit oder Variation der Stichproben. Der Wilcoxon-Rank-Sum-Test hilft,

signifikante Unterschiede zwischen den Parametern „Umfang“ und „Fläche“ der kanadischen und sibirischen Thermokarstseen mit einem Signifikanzniveau von weniger als 5 Prozent zu erkennen. Deshalb ist es notwendig, dass die Stichproben richtig geordnet und sortiert sind. Die Ergebnisse aus dem nicht-parametrischen Test sind in Tabelle 5-1 aufgelistet.

Tabelle 5-1: Variation zwischen kanadischen und sibirischen Thermokarstseen

(TYRALLOVA & GONSCHOREK, 2012)

Wilcoxon-Rank-Sum-Test	sibirische Gr. A – kanadische Gr. A	sibirische Gr. A – sibirische Gr. B	kanadische Gr. A – kanadische Gr. B	sibirische Gr. B – kanadische Gr. B
Testergebnis W	99813	18294	522	679
Wahrscheinlichkeit p	7.03e-08	8.17e-06	3.23e-08	0.6925
Signifikanzniveau			$\alpha = 0.05$	

Mit dem Wilcoxon-Rank-Sum-Test zeigt sich, ob die Variation zwischen zwei Gruppen signifikant ist oder nicht. Wenn die Wahrscheinlichkeit größer als α ist, die beobachteten Unterschiede sind nicht signifikant ($p > \alpha$). Es bedeutet Gemeinsamkeiten zwei Gruppen. Bei dem anderen Fall $p < \alpha$ sind die Unterschiede signifikant.

Beobachtete Unterschiede in dem Box-and-Whisker-Plot werden mit dem Wilcoxon-Rank-Sum-Test numerisch geprüft und bestätigt.

5.3 Zusammenfassung

An zwei Beispielen (in 2 Testgebieten) wird in dieser Arbeit gezeigt, dass bestimmte Abhängigkeiten zwischen den Objektvariablen (Variablen der Thermokarstseenfläche bis zu 500.000 Quadratmeter) existieren. Es werden funktionale Zusammenhänge zwischen der Variablen großer Thermokarstseen (Seefläche größer als 500.000 Quadratmeter) berechnet und die Variation wird beim *shape index* als nicht signifikant festgestellt.

Die so erzielten Ergebnisse verlangen eine weitere und detaillierte Forschung. Es existieren offensichtlich Strukturen der exponentiellen Verteilung zwischen den Variablen der Thermokarstseen wie Umfang, Radius und Fläche.

Die oben genannten Variablen, der daraus berechnete Index der Form sowie die Asymmetrie sind wesentliche geometrische Maße für eine korrekte Objektidentifikation. Gewässer können mit hoher Präzision aus Fernerkundungsdatensätzen detektiert werden. Aber ohne Kenntnis über oben genannte Parameter und deren Vergleich oder zusätzliche Daten kann man nach Anwendung ausschließlich der klassischen pixel- und objektbasierten Klassifikation keine qualitativen Unterschiede feststellen, wie zwischen natürlichen und künstlichen Gewässern, zwischen Seen und Flüssen.

Die Spektralsignatur gefrorener Wasseroberflächen unterscheidet sich von nicht gefrorener Gewässer, was bei der Identifikation dieser Objekte berücksichtigt werden muss.

Zusätzliche Daten zu den multispektralen Fernerkundungsdaten (wie Höhendaten, Texturdaten) würden weitere Analysen ermöglichen. In dieser Arbeit wird gezeigt, welche Schlussfolgerungen und Charakterisierungen basierend auf Satellitenbilddaten ohne Höheninformation oder andere zusätzliche Daten möglich sind.

Der Wilcoxon-Rank-Sum-Test wird für Parameter Fläche, Umfang und maximaler Abstand vom Schwerpunkt des Objektes zum Rand (Länge der Hauptachse) und Shape Index durchgeführt. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß r^2 war 0,83, zeigt gutes aber nicht sehr gutes Ergebnis als in der kanadischen Gruppe A.

Mit dem Box-and-Whisker-Plot und mit dem Wilcoxon-Rank-Sum-Test zeigte sich, dass die Variation zwischen zwei Gruppen signifikant ist. Es gibt nur eine Ausnahme, die kanadische und sibirische Gruppe B zeigt keine signifikanten Unterschiede. Außer dem shape index werden auch andere Parameter berechnet, z.B. die Asymmetrie der Objekte und Elliptisches Fitting.

Die sibirische und kanadische Gruppe B der Thermokarstseen zeigen keine Korrelation. Die Daten zeigen große Abweichungen. Für die Gruppe muss eine andere explorative Methode als die Regressionsanalyse getestet und untersucht werden.

In der weiteren Forschung ist es wichtig zu prüfen, ob nur die exponentielle Form der Regression zu brauchbaren Ergebnissen führt oder ob man unter Verwendung anderer Formen zu besseren Ergebnissen (adjustiertes Bestimmtheitsmaß *größer als 0,75*) kommen kann.

Der Index Elliptisches Fitting beschreibt, wie gut sich ein Objekt mit seinen Proportionen einer Ellipse ähnelt. Die Werte bewegen sich zwischen 0 (keine Anpassung) und 1 (perfekte Anpassung). Der Index erreicht Werte 0,755 bis 0,941 bei sibirischen Thermokarstseen. Die Indexwerte kanadischer Thermokarstseen variieren zwischen 0,782 und 0,963.

6 Geovisualisierung

Tausende von Thermokarstseen, multivariate natürliche Objekte, werden in verschiedenen Regionen von Kanada, Alaska und Sibirien über große Gebiete untersucht, um räumliche Zusammenhänge der Objektattribute Größe, Form und Lage der Oberflächenformen zu erkennen. In den Testgebieten decken die Thermokarstseen fast 27 % der Untersuchungsfläche ab.

Die Arbeit verdeutlicht, wie Attribute von Objekten, in diesem Fall Oberflächenformen, (miteinander) in Verhältnis stehen und was ihre Besonderheiten sind.

6.1 Geovisualisierung multivariater natürlicher Objekte

In diesem Kapitel wird die Geovisualisierung der multivariaten natürlichen Objekte für besseres Verständnis für räumliche und zeiträumliche Relationen der Objekte untersucht. Geovisualisierung der Daten und Informationen natürlicher Objekte dient nicht nur der Dokumentation der Forschung, sondern auch als Werkzeug zur Detektion der räumlichen / raumbezogenen Verhältnisse.

Ausgewählte Methoden werden verwendet, um räumliche Eigenschaften von Oberflächenformen (Objektattribute) und deren Verhältnis zueinander verlinkt mit kartenähnlichen Darstellungen sichtbar zu machen. Konkret am Beispiel von Thermokarstseen werden die Attribute Lagebezug, Fläche und Form (Asymmetrie, Länge der Hauptachse) erarbeitet. Diese Attribute werden auch automatisiert berechnet und in der Attributtabelle gespeichert.

Multivariate Daten bezeichnet MAZZA (2009) als Daten mit mehr als vier Attributen. Wenn es sich um eine begrenzte Zahl, z.B. 50 Objekte oder 50 Eigenschaften eines Objektshandelt, kann der Mensch mit seinem Wissen und seiner Expertise diese Informationen ohne Hilfsmittel speichern und auswerten. Wenn sich die Datenzahl aber erhöht auf mehrere Hundert oder Tausend, sind andere Hilfswerkzeuge notwendig. Bei einem derartigen Datenaufkommen sind Visualisierungen zur Verbesserung der Erfassung und Findung von Entscheidungsprozessen hilfreich. Multivariate Daten sind als Daten vom großen Umfang mit mehreren Attributen zu betrachten. Ziel der Visualisierung ist,

komplexe Zusammenhänge einfach und nachvollziehbar zu erklären (Mazza, 2009).

Konkret werden die räumlichen Zusammenhänge der Objektattribute von Größe, Form und Lage der Thermokarstseen behandelt, die durch Permafrostdegradation gebildet worden sind. Thermokarstseen sind Degradationsformen, die als Ergebnis des Tausens von Permafrost entstanden sind. Durch das Auftauen des Permafrosts sind die Senken häufig mit Wasser gefüllt (FRENCH 2007).

Thermokarstseen haben einen Komplexitätsgrad, der das automatisierte Objektidentifikationsverfahren (AOI) nicht verhindert, sondern ermöglicht. Aus folgendem Grund werden diese Oberflächenformen als Beispiel für multivariate natürliche Objekte gewählt.

Ziel ist (im Geovisualisierungskapitel) das Kombinieren von bekannten Visualisierungsmethoden mit Techniken, die in anderen Bereichen (Design, Informatik, Medizin, Kunst) typisch sind. Eine Karte ist wertvoll und nützlich, enthält definitionsgerecht begrenzte Information visualisierter Objekten. Das ist abhängig vom Zweck der Karte. Dies kann durch die Kombination von Karten mit anderen Ausgaben von statistischen Analysen und verschiedene Visualisierungen von gewünschten oder benötigten Informationen verbessert werden. Visuelle Verlinkungen können helfen, die Verdeckung der relevanten Informationen zu vermeiden (STEINBERGER et. al., 2011). Kern der Geovisualisierung ist das Verlinken von Visualisierungsmethoden und kartenähnlichen Darstellungen.

Es gibt eine Reihe von Methoden zur Visualisierung großer multivariater Datenvolumina. Allerdings sind einige Methoden, wie z. B. das Paralleldiagramm, nicht geeignet für größere Datenmengen, wenn man mehr als den Trend und Abweichungen ableiten will. Die jeweiligen Einzelwerte sind aus der Darstellung schwer ablesbar. Obwohl es möglich ist, die Einstellungen des Paralleldiagramms zu optimieren, sollte diese Methode nicht immer die erste Wahl sein, wenn es sich um Visualisierung von voluminösen Daten und Informationen handelt. Es ist empfehlenswert nach dem Nutzungszweck und nach der Art der Daten zu entscheiden.

Für multivariate natürliche Objekte, deren Objektattribute und ihre Relationen dargestellt werden sollen, wird eine innovative Visualisierungsmethode angewendet.

Daher wird für die Visualisierung voluminöser multivariater Daten die Methode des Sterndiagramms gewählt, für den Zweck der Visualisierung jeweiliger Attribute und deren Zusammenhänge ist sie besser geeignet als Paralleldiagramm. Die Objektattribute sind im Sterndiagramm entgegen dem Uhrzeigersinn, beginnend mit der x-Achse (von Westen nach Osten) in der folgenden Reihenfolge dargestellt: Fläche, Umfang, maximaler Abstand vom Schwerpunkt des Objektes zum Rand (Länge der Hauptachse), minimale Abstand vom Schwerpunkt des Objektes zum Rand (Länge der Nebenachse), Index der Form und Asymmetrie (vgl. Abb. 6-1).

Sterndiagramme werden verwendet, um multivariate Daten und Informationen zu visualisieren. Dabei wird sichtbar gemacht, wie /ob die Objektattribute miteinander in Beziehung stehen. Darüber hinaus wird die allgemeine Notwendigkeit der Geovisualisierung mit einem Sterndiagramm verdeutlicht. Variablen wie Umfang, Radius und Fläche, Index der Form, Asymmetrie, Elliptisches Fitting helfen, Thermokarstseen als Objekte umfassend zu beschreiben.

Der Index der Form „*shape index* (S_i)“ ist nach Hinkel et.al. (2005) definiert (vgl. Gl. 6-1). Der Index der Form beschreibt die Glätte der Objektbegrenzung, je kleiner der Indexwert ist, desto weniger komplex ist das Objekt. Um Objekte mit Hilfe einer Formel zu beschreiben, wird in dieser Arbeit der *shape index* verwendet:

$$S_i = \frac{\text{Umfang}}{4 \cdot \sqrt{\text{Fläche}}} \quad (6-1)$$

Das mathematisch beschreibbare und vergleichbare Maß S_i wird berechnet und in Abb. 17 mit anderen Parametern dargestellt.

Die Berechnung der Asymmetrie (A) erfolgt nach HINKEL et. al. (2005), vorausgesetzt, die Form des ausgewerteten Objekten ist annähernd elliptisch, sowie(vgl. Gl. 6-2).

$$A = 1 - \frac{L_b}{L_a} \quad (6-2)$$

Mit den Längen (L) von Nebenachse (b) und Hauptachse (a).

Der Wert von A liegt zwischen 0 und 1. Je größer der Wert, desto asymmetrischer ist die Oberflächenform. Der Mittelpunkt (die Koordinaten) des Sterndiagramms ist identisch mit dem Schwerpunkt des detektierten Objektes.

Das Sterndiagramm bildet Informationen über Objekte, ihre räumliche Beziehung zu anderen Objekten und über Attribute der Objekte ab. Das Element Stern wird durch oben genannte Attribute, die Lage und die Beziehung zu anderen Elementen charakterisiert. Eine Standardisierung der Variablen ist notwendig, um Vergleiche der jeweiligen Attributwerte zu ermöglichen.

Diese Darstellung (vgl. Abb. 6-1) ist ein Beispiel für die unterstützende Rolle der Visualisierung in einem Entscheidungsprozess. Es ermöglicht einen kompakten Überblick über alle Objektattribute und Relationen. Diese Form der Darstellung zeigt deutlich, welcher Mehrwert aus der Visualisierung gewonnen werden kann. Die in einer Karte dargestellten identifizierten Objekte haben eine eindeutige Identifizierungsnummer ID, die der Nummer für jeden Stern in der Diagrammdarstellung entspricht. Der Schwerpunkt eines Thermokarstsee hat die gleichen geographischen Koordinaten wie der Mittelpunkt des entsprechenden Sternelements in der Diagrammdarstellung. Das Ziel ist, räumliche (möglich in weiterer Forschung – raumzeitliche Relationen) Beziehungen der Oberflächenformen, ihrer Verteilung sowie ihrer möglichen Musterbildung zu erforschen.

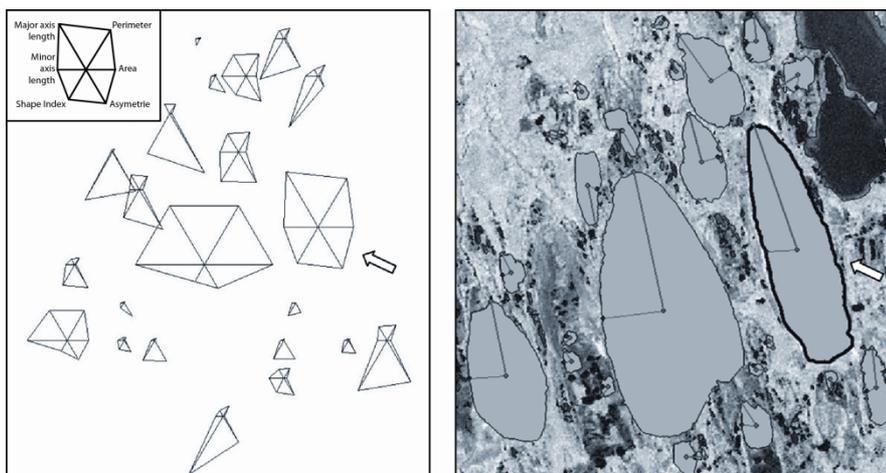


Abbildung 6-1: Räumliche Relationen der Objektattribute und der Objekte, Sterndiagramm verlinkt mit einer kartenähnlichen Darstellung (GONSCHOREK & TYRALLOVA, 2012)

In der Arbeit wurde ein Ausschnitt der Objektausbreitung in verschiedenen Regionen gewählt. Die Datensätze in dem Ausschnitt beinhalten verschiedene häufige Ausprägungen aber auch Extremfälle der gleichen Oberflächenform, wie diese in der Natur vorkommen. Abbildung 6-2 zeigt Thermokarstseen (vgl. Abb. 6-2b) und andere Objekte -Flüsse (vgl. Abb. 6-2d). Dies sind typische Wasserkörper, die meist sehr schwierig voneinander zu unterscheiden sind. Wenn jedoch die Vorteile des Sterndiagramms mit der kartenähnlichen Darstellung verbunden werden (vgl. Abb. 6-2), kann man diese beiden Oberflächenformarten allein auf der Basis der Geovisualisierung voneinander unterscheiden.

Dank der Datensicht (Umfang, Fläche, Länge der Haupt- und Nebenachse) und Informationsdarstellung (Shape Index, Asymmetrie) sowie der Verbindung zwischen ihnen wird es einfacher, zwischen diesen Arten von Wasserkörpern zu unterscheiden.

Aus der Darstellung und aus den Attributtabelle ist ersichtlich, dass alle Ausprägungen von Thermokarstseen (vgl. Abb. 6-2, a) durch einen ausgeprägten Shape Index und Asymmetrie im Vergleich zu den anderen Parametern gekennzeichnet sind. Im Falle der Thermokarstseen mit größerer Fläche (50.000 Quadratmeter oder mehr) sind die Parameter ausgeglichener. Dies ist ein Hinweis darauf, dass größere Thermokarstseen in der Regel sehr symmetrisch sind, d.h.

die Haupt- und Nebenachse sind ähnlich lang und der Wert der Asymmetrie nähert sich dem Wert "0". Dies wird verursacht durch die Entwicklung der größeren Oberflächenformen. Die größeren Thermokarstseen sind in der Regel älter und sind durch das Zusammenwachsen von mehreren kleineren Seen entstanden. Das Zusammenführen entsteht in der Regel in mehrere Richtungen (Ulrich, 2011). Ein wichtiger Einflussfaktor ist das Relief in der untersuchten Region.

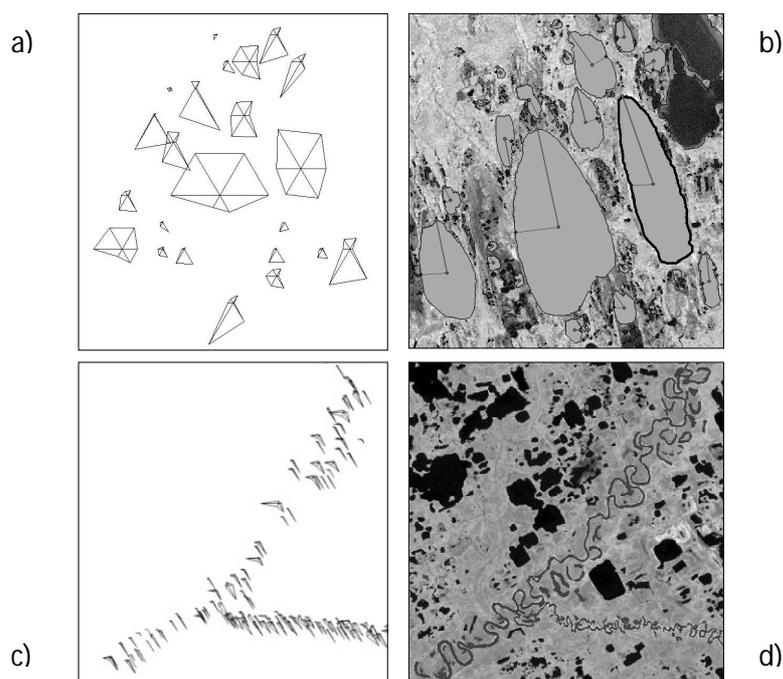


Abbildung 6-2: Paralleldarstellung der Wasserkörper (b, d) und Geovisualisierung deren Parameter (a, c) (GONSCHOREK & TYRALLOVA, 2012)

Mäandrierende Flüsse sind schwierig nur auf Basis von optischen Fernerkundungsdaten automatisiert zu identifizieren. Multispektraldaten ermöglichen die automatisierte Identifizierung der Flusssegmente unter der Bedingung, dass das Flussbett (Fluss-Becken) nicht völlig ausgetrocknet ist. Daher wird jedes Fluss-Segment mit einem Sterndiagramm dargestellt. Bei den Flusssegmenten (vgl. Abb. 6-2, c) ist der Parameter Asymmetrie dominant. Dies entspricht auch der Realität, da Flüsse offensichtlich weit asymmetrischer sind als

Thermokarstseen. Die Hauptachse ist deutlich länger als die Nebenachse, d.h. der Asymmetrie-Wert nähert sich dem Wert „1“.

6.2 Zusammenfassung

Die Fallstudie zeigt, wie sinnvoll die Unterscheidung von Datendisplay und Visualisierung von Informationen ist. Viele wissenschaftliche Arbeiten berücksichtigen diese Unterschiede nicht. Daraus resultieren die oft überfüllten und komplexen Daten-Visualisierungen. Auf einer konzeptionellen Ebene wird ein allgemeiner Rahmen für räumliche Analysen und Visualisierungstechniken sowie Visualisierungsmethoden vorgestellt. Anhand eines konkreten Beispiels wird gezeigt, wie dieses Konzept funktioniert. Das Ziel, Informationsextraktion aus Daten und weitere Verarbeitung bis zur geeigneten Visualisierung, wurde erreicht.

Am Beispiel von Thermokarstseen wird gezeigt, dass die Geovisualisierung von Daten und Informationen natürlicher Objekte nicht nur der Dokumentation der Forschung, sondern auch als Werkzeug zur Detektion der räumlichen / raumbezogenen Verhältnisse dient. Geovisualisierung kann den Mehrwert bei Untersuchungen verdeutlichen. Das Auswählen einer geeigneten Darstellungsmethode und (für Beschreibung der Oberflächenformen) die Bestimmung konkreter Parameter zur Objektbeschreibung ist sehr wichtig.

Es werden ausgewählte Methoden und Techniken präsentiert, um räumliche Beziehungen der Objektattribute zu erkennen und mit einer Karte zu verlinken. Konkret geht es um die räumlichen Beziehungen von Größe, Form und Lage der Thermokarstseen, die durch Permafrostdegradation entstanden sind. Sterndiagramme werden verwendet, um multivariate Daten zu visualisieren und Relationen zwischen den Oberflächenformattributen sichtbar zu machen. Das Verknüpfen von Visualisierungsmethoden mit kartenähnlichen Darstellungen bietet den Vorteil des Raumbezugs. Es kann leicht visuell erfasst werden, ob sich mögliche Trends zwischen den Objektattributen abbilden. Aus der relativen Lage der Objekte zueinander lassen sich neue Objektinformationen ableiten.

7 Ergebnisse

Das Ergebnis der Arbeit besteht aus einer Zusammenstellung von fachübergreifenden Methoden und deren Anwendung sowie einer Konzeption, Implementierung und Automatisierung eines Verfahrens zur Objektidentifikation terrestrischer Oberflächenformen. Massendaten und massenhafte Informationen werden in einem Geoinformationssystem verarbeitet und analysiert. Isolierte natürliche Objekte werden mit Objektparametern in Form von Werten und Indizes charakterisiert.

Das Konzept der Objektidentifikation hat eine modular basierte und skalierbare Architektur. Der Prozess der Objektidentifikation basiert auf einem Objektkatalog, der die Charakteristik der Objekte über geomorphologische Parameter ermöglicht. Wesentlicher Teil der Arbeit ist die informationstechnologische Umsetzung des Konzeptes. Die Werkzeuge zur automatisierten Objektidentifikation sind im Geoinformationssystem implementiert und können auch in andere Umgebungen übertragen werden.

Thermokarstseen werden als beispielhafte Oberflächenform und Datengrundlage für die Implementierung des Algorithmus verwendet. Die Objektidentifikation erfolgt auf der Basis multispektraler Satellitendaten.

In vorliegender Arbeit wird gezeigt, dass die Geovisualisierung von Daten und Informationen terrestrischer Oberflächenformen nicht nur für Präsentationszwecke, sondern auch als Instrument zur Identifikation raumbezogener Relationen der Objekte verwendet werden soll und kann. Geovisualisierung kann die Zusammenhänge der Objektparameter verdeutlichen. Für voluminöse multivariate Daten ist eine geeignete Wahl der Darstellungsmethode sehr wichtig. Hier werden Sterndiagramme mit kartenähnlichen Darstellungen kombiniert, um den Mehrwert visualisierter Ergebnisse dem Nutzer nahe zu bringen.

Das automatisierte Verfahren für die Objektidentifikation ist für isolierte Oberflächenformen über große Flächen signifikant. In Abbildung 7-1 sind die Teilergebnisse des Objektidentifikationsprozess dargestellt:

1. Bilddaten nach der Vorverarbeitung (Atmosphärenkorrektur, Strahldichte Konvertierung); Anwendung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), eines von in der Analyse verwendeten Indikatoren. Wasserkörper enthalten Biomasse mit geringer oder keiner Aktivität, so dass der NDVI Wert zwischen -1 bis 0 schwankt. Output Daten der räumlichen Analysen sind flächenhafte Daten, die als vektorbasierte Abgrenzung der Objekte zu finden sind.

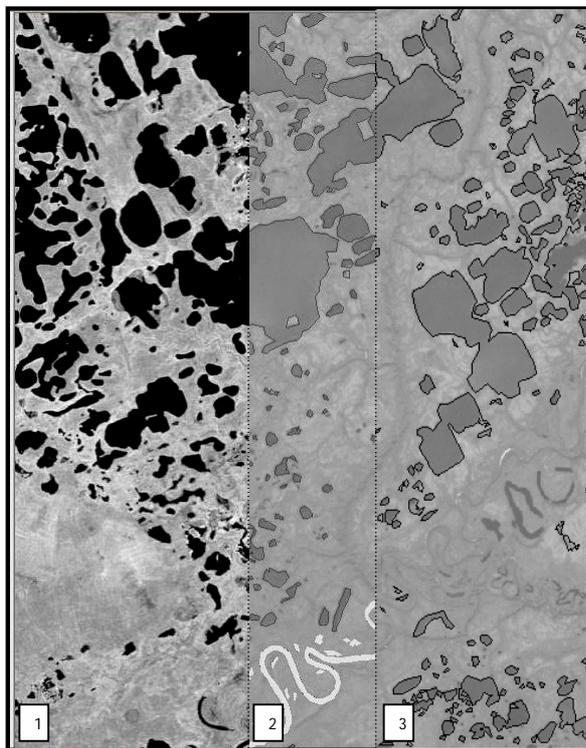


Abbildung 7-1: (1) Bilddaten nach der Vorverarbeitung; (2) Ausgangsdaten räumlicher Analysen, (3) positiv identifizierte Objekte (GONSCHOREK & TYRALLOVA, 2012)

2. Objekte kleiner als 10 000 m² werden ausgeschlossen. Negative Objekte werden ausgefiltert. Es handelt sich um Objekte, die nicht den gesuchten Features entsprechen. Fluss-Segmente werden ebenfalls ausgeschlossen.
3. Schließlich sind die positiv identifizierten Objekte dargestellt. Es handelt sich um vektorbasierte Abgrenzung der detektierten flächenhaften Daten.

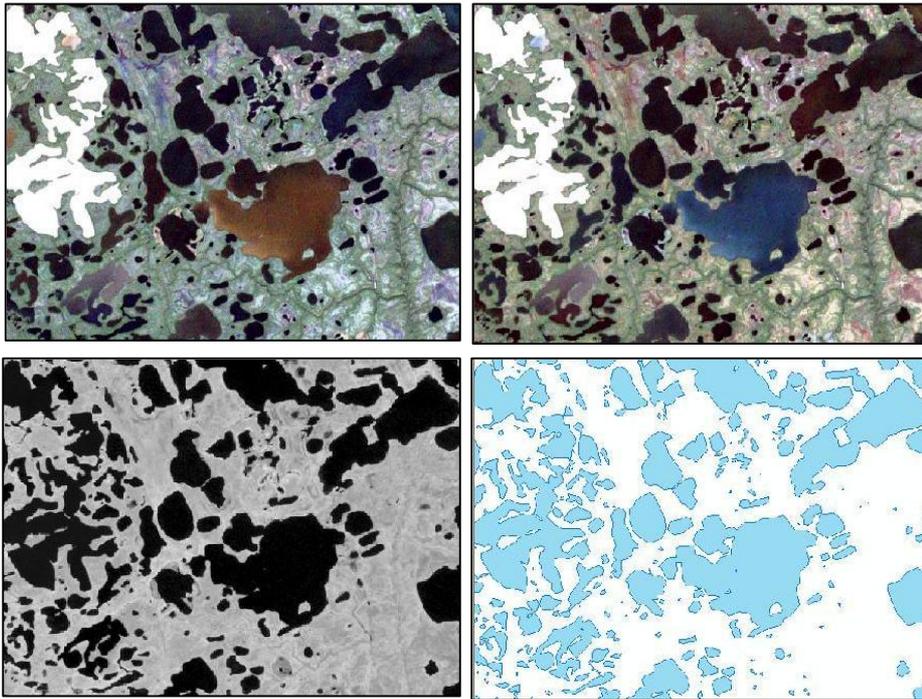


Abbildung 7-2: Ergebnisse des AOI Prozesses -Thermokarstseen – Ausschnitt: Testgebiet in Kanada (TYRALLOVÁ, 2011)

Partielle Ergebnisse des AOI Prozesses (vgl. Abb. 7-2) werden von der Eingabe der multispektralen Fernerkundungsdaten bis zur vektorbasierten Abgrenzung der identifizierten Thermokarstseen in einem Ausschnitt des Testgebiets in Kanada gezeigt (TYRALLOVÁ, 2011).

Abbildung 7-3 zeigt die vektorbasierte Abgrenzung der identifizierten Oberflächenformen: Thermokarstseen, den berechneten Schwerpunkt sowie den maximalen (blau) und minimalen Abstand (rot) vom Schwerpunkt zur Abgrenzung des Objektes.

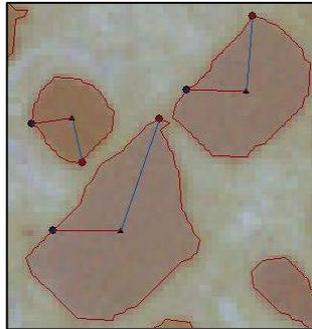


Abbildung 7-3: Vektorbasierte Abgrenzung der identifizierten Thermokarstseen

Einer der Vorteile des AOI Ablaufes besteht darin, dass dessen Anwendung nicht auf bestimmte Daten beschränkt ist. Weil das Konzept der automatisierten Objektidentifikation modular und skalierbar ist, ist es auf andere Objekte unter Verwendung unterschiedlichen Primär- und Zusatzdaten übertragbar. Implementierte Werkzeuge der 2. und 3. Ebene (vgl. Abb. 4-1) kann man ohne weiteres für andere multispektrale Satellitenbilddaten, einsetzen. Werkzeuge der ersten Ebene müssen für andere Fernerkundungsdaten modifiziert werden, weil sich die Eingabeparameter ändern. Die Eingabeparameter sind von der konkreten Spezifikation des Sensors abhängig.

8 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine automatisierte Prozesskette zur Objektidentifikation entwickelt. Es werden neue Ansätze und Konzepte der objektbasierten Identifikation von natürlichen isolierten terrestrischen Oberflächenformen behandelt und implementiert. Die Geovisualisierung der multivariaten natürlichen Objekte wird für besseres Verständnis der räumlichen Relationen der Objekte eingesetzt. Das wissenschaftliche Ziel der Arbeit wurde erreicht.

Die Prozesskette kann anhand ausgewählter Kriterien an konkrete Objekte angepasst und umgesetzt werden. Das Konzept der Objektidentifikation ist modular und skalierbar. Die modulbasierte Architektur ermöglicht den Einsatz sowohl einzelnen Modulen als auch ihre Kombination und mögliche Erweiterung.

Das Ziel der Objektidentifikation und die daran anschließende Charakteristik der geomorphometrischen Parameter wurden umgesetzt. Der AOI Prozess wird von statistischen Verfahren unterstützt. Diese ermöglichen die Vergleichbarkeit von Objektparametern. Mit Hilfe der Regressions- und Varianzanalyse werden Verhältnisse zwischen Objektparametern untersucht. Es werden funktionale Abhängigkeiten der Parameter analysiert um die Objekte qualitativ zu beschreiben. Damit wird ermöglicht automatisiert berechneten Maße und Indizes der Objekte als quantitative Daten und Informationen zu fassen. Quantitative Aussagen können über gesuchte Objekte getroffen werden.

Der fachübergreifende Ansatz der Arbeit erfordert neben Fragestellung geoinformatischer Methodik und Entwicklung, Methoden der Fernerkundung zur Erfassung, erweiterten Verarbeitung und Verwaltung von Geoobjekten sowie Methoden der Kartographie für Geovisualisierung. Weil Oberflächenformen sowohl Geoobjekte als auch natürliche Objekte sind, wird für die Charakteristik der Objekte auch Methodeninventar der Geomorphologie eingesetzt. Methoden der algorithmischen Geometrie sowie der deskriptiven und induktiven Statistik fließen in die Arbeit ein, um Objekte mathematisch und automatisiert zu beschreiben.

Der automatisierte Prozessverlauf der Objektidentifikation hat zwei Ebenen:

1. Eine konzeptuelle Ebene mit generischem Ansatz. Dieser ist gewählt, um einen generischen Prozess nutzen und seine Komponenten spezifisch, nach Bedarf der Objekte anpassen zu können.
2. Die zweite Ebene, die der Prozesskette, ist implementiert. Sie besteht aus Komponenten, die getrennt verwendbar und umtauschbar sind. Für ausgesuchte Objekte und verfügbare Daten wird die Prozesskette verfeinert. Die automatisierte Objektidentifikation ist in einer proprietären GIS-Umgebung implementiert, sie kann erweitert oder in andere Umgebungen übertragen werden. Der gesamte Prozess wird effektiv mit multispektralen Satellitenbildern von Landsat ETM+ umgesetzt.

Der fernerkundungsbasierte Ansatz der automatisierten Objektidentifikation isolierter terrestrischer Oberflächenformen ist auf andere terrestrische Oberflächenformen übertragbar, die die definierten Kriterien (Kapitel 3.2) erfüllen. In dieser Arbeit beschriebene Methoden und Verfahren sind am sinnvollsten, in Gebieten einsetzbar, wo keine Feldkampagne möglich ist. Das sind in der Regel schwer zugängliche Gebiete auf der Erde. Weil die Verfahren GIS-gestützt und automatisiert ablaufen, sind sie von großem Vorteil für die Identifikation, Charakteristik sowie Kartierung der Objekte, die über große Flächen und in Objektdichten vorhanden sind. GIS-gestützte Verfahren werden eingesetzt um auch voluminöse multivariate Daten raumbezogen verarbeiten können. Die Übertragbarkeit der Prozesskette auf andere Objekte kann am Beispiel äolischer Formen – Sanddünen - getestet werden. Außerhalb des Systems Erde kann der AOI Prozess auf andere Planeten adaptiert werden. Auf dem Mars ist die berührungsfreie Beobachtung primäre Methode, auf anderen Planeten derzeit die einzige Möglichkeit Daten aufzunehmen.

Für weitere Forschungen sind temporale Veränderungen und ihre Detektion zu konzipieren und zu untersuchen. Andere Techniken der Objektidentifikation und Arten der Darstellungsmethoden sind zu testen bzw. zu erweitern, darüber hinaus soll der raumzeitliche Aspekt Berücksichtigung finden. Das Konzept multipler,

interaktiver und verlinkter Informationen soll validiert und umgesetzt werden. Dabei müssen die Zielgruppe und der Zweck der Visualisierung im Fokus bleiben.

Als wichtige Perspektive für die Optimierung des Verfahrens wird das Hinzufügen weiterer Informationen aus Bilddaten und Höhendaten (z.B. digitales Geländemodell) betrachtet. Insbesondere ist bei den konkreten Objekten der Thermokarstseen deren Tiefe von Interesse. Sie kann bei einem vorhandenen DEM unter bestimmten Bedingungen abgeleitet werden. Das Attribut Tiefe ist ein wichtiger Parameter bei diesen Formen. Allerdings sind Höhendaten in geographischen Breiten mit Permafrost Vorkommen oft nicht ausreichend hinsichtlich der Vollständigkeit oder der Genauigkeit des DEMs. Darüber hinaus sind zusätzliche Daten über Wind und Wassertemperatur nützlich.

In der weiteren Forschung ist es wichtig zu prüfen, ob nur die exponentielle Form der Regression zu brauchbaren Ergebnissen führt oder ob man unter Verwendung anderer Formen zu besseren statistisch belegbaren Ergebnissen (adjustiertes Bestimmtheitsmaß größer als 0,75) kommen kann. Wie der Index der Form kann auch der Index „Elliptisches Fitting“ statistisch ausgewertet werden um detaillierte Aussagen über diesen Parameter zu bekommen.

Die sibirische und kanadische Gruppe B der Thermokarstseen zeigen keine Korrelation. Die Daten zeigen große Abweichungen im Gegensatz zur Gruppe A der sibirischen und kanadischen Thermokarstseen. Für die Gruppe B muss eine andere explorative Methode als die Regressionsanalyse getestet und untersucht werden.

Quellenverzeichnis

- AHNERT, F. (2003), Einführung in die Geomorphologie, 3. Aufl., Eugen Ulmer, Stuttgart, 477.
- BILL, R. & ZEHNER, M. L. (2001), Lexikon der Geoinformatik, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 312.
- BLASCHKE, T. & STROBL, J. & Schrott L. & MARSCHALLINGER, R. & NEUBAUER, F. & KOCH, A. & BEINAT, E. & HEISTRACHER, T. & REICH, S. & LEITNER, M. & DONERT, K. (2012), Geographic Information Science as a common cause for interdisciplinary research – In: Gensel J., Josselin, D., Vandenbroucke, D. Bridging the Geographic Information Sciences. Springer Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Berlin, Heidelberg, 411-427.
- BROWN, D. G. (1998), Classification and boundary vagueness in mapping presettlement forest types. – In: International Journal of Geographical Information Science 12, 105-129.
- BROWN, J. & FERRIANS, O. & HEGINBOTTOM, J. A. & MELNIKOV, E. (1997), Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10.000.000, 1 sheet, Washington, DC.
- BÜDEL, J. (1982), Climatic Geomorphology, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 443.
- CHANDER, G. & MARKHAM, B. L. & HELDER, D. L. (2009), Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors – In: Remote Sensing of Environment.- 113, 5, 893-903.
- CRAWLEY, M. J. (2007), The R Book, John Wiley & Sonst Ltd., Chichester/West Sussex, 942.
- DE LANGE, N. (2002), Geoinformatik in Theorie und Praxis, Berlin, Springer, 438.

- DEMEK, J. & EMBLETON, C. & GELLERT, J. F. & VERSTAPPEN, H. Th. (1976),
Handbuch der geomorphologischen Detailkartierung, Verlag Ferdinand
Hirt, Wien, 463.
- DRAGUT, L. & BLASCHKE, T. (2006), Automated classification of landform
elements using object-based image analysis. – In: Geomorphology.-81,
330-344.
- DRAGUT, L. & TIEDE, D. & LEVICK, S. R. (2010), ESP: a tool to estimate scale
parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed
data – In: International Journal of Geographical Information Science.-24,
859- 871.
- EISANK, C. & DRAGUT, L. & GÖTZ, J. & BLASCHKE T. (2010), Developing a semantic
model of glacial landforms for object-based terrain classification – the
example of glacial cirques – In: The International Archives of the
Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.
XXXVIII-4/C7.
- ESA DUE (2010), ESA Data User Element (DUE) Projekt. – Web:
<<http://due.esrin.esa.int/prjs/prjs116.php>>

letzter Aufruf am 08.02.2013.
- FRENCH, H. M. (2007), The Periglacial Environment, John Wiley and Sons,
Chichester, 458.
- FROHN, R. C., HINKEL, K. M., EISNER, W. R. (2005), Satellite remote sensing
classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North
Slope of Alaska – In: Remote Sensing and Environment.-97, 1, 116-126.
- GEOINFORMATIK LEXIKON (2001-2012), Professur für Geodäsie und Geoinformatik
(GG) AUF Universität Rostock, Rostock (online) Verfügbar auf:

<<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>>

letzter Aufruf am 11.02.2013.

GMK.digital (2007), Das interaktive Online- Portal für Geomorphologische Karten der Bundesrepublik Deutschland, Salzburg (online) Verfügbar auf:
<<http://gidimap.giub.uni-bonn.de/gmk.digital/home.htm>>

letzter Aufruf am 11.02.2013.

GONSCHOREK, J. & L. TYRALLOVA (2012), Geovisualization and Geostatistics: A Concept for the Numerical and Visual Analysis of Geographic Mass Data. In: Murgante, B., Gervasi, O., Misra, S., Nedjah, N., Rocha, A.M., Taniar, D. & B. Apduhan eds., 12th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2012) Salvador da Bahia, 18-21 Jun 2012, Part II LNCS 7334, Springer, Berlin/Heidelberg, 208-219.

HAKE, G., D. GRÜNREICH & L. MENG (2002), Kartographie. Visualisierung raumzeitlicher Informationen, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 604.

HESE, S. & GROSSE, G. & PÖCKING, S. (2010), Object based thermokarst lake change mapping as part of the ESA Data User Element (DUE) permafrost. OBIA Conference 2010, Genth, Belgien, ISPRS Vol. XXXVIII-4/C7, 1682-1777.

HINKEL, K. M., FROHN, R. C., NELSON, F. E., EISNER, W. R., BECK, R. A. (2005), Morphometric and spatial analysis of thaw lakes and drained thaw lake basins in the western arctic coastal plain, Alaska, Wiley Inter Science, 327-341.

HUNZIKER, H. W. (2006), Im Auge des Lesers: foveale und periphere Wahrnehmung – vom Buchstabieren zur Lesefreude, Transmedia Stäubli Verlag, Zürich.

KATEY, W.A. (2003), Photo of Thermokarst Lakes, Autor: Katey Walter Anthony, Primary Investigator of NSF IPY #0732735 Project: "IPY: Understanding the impacts of permafrost degradation and thermokarst lake dynamics in the Arctic on carbon cycling, CO₂ and CH₄ emissions, and feedbacks to climate change"., UAF Institute of Northern Engineering, Verfügbar

auf: <<http://ine.uaf.edu/werc/people/katey-walter-anthony/thermocarst-lakes/>>

letzter Aufruf am 07.02.2013.

KLEIN, R. (2005), Algorithmische Geometrie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen, Springer, Berlin/Heidelberg, 392.

KÖPPEN, W. & GEIGER (1954), Climate of the Earth (map: 1:16 mio), Justus Perthes, Darmstadt, Deutschland.

KREITEL, W. A. (2008), Ressource Wissen: Wissensbasiertes Projektmanagement erfolgreich im Unternehmen einführen und nutzen. Gabler Verlag Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden.

LANDSAT 7 HANDBOOK (2011) Science Data Users Handbook – Landsat 7, NASA, Verfügbar auf:

<http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html>

letzter Aufruf am 15.02.2013.

LEXIKON DER FERNERKUNDUNG (2012) Friedrichshafen, Verfügbar auf:

<<http://www.fe-lexikon.info>>

letzter Aufruf am 15.03.2013.

LOZÀN, J.L. & H. KAUSCH (2007), Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler. 4nd ed. Wissenschaftliche Auswertung, Hamburg, 304.

MITASOVA, H. & MITAS, L. & Harmon, R. S. (2005), Simultaneous spline approximation and topographic analysis for lidar elevation data in open source GIS. –In: IEEE Geoscience and remote sensing letters.-2, 4, 375-379.

- MINÁR, J. & EVANS, I. S. (2008), Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. – In: *Geomorphology*.-95, 236-259.
- MOORE, A. B. & MORRIS, K. P. & BLACKWELL, G. K. & JONES, A. R. & SIMS, P. C. (2003), Using geomorphological rules to classify photogrammetrically - derived digital elevation models. – In: *International Journal of Remote Sensing*.-24, 2613- 2626.
- NSIDC (2013), NSIDC : National Snow & Ice Data Center, Verfügbar auf:
<<http://nsidc.org/api/metadata?id=g01175>>
letzter Aufruf am 01.03.2013.
- NEUBERT, M. (2006), Bewertung, Verarbeitung und segmentierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen, Rhombos-Verlag Berlin, 152.
- ORIGINLAB (2011), Originlab, Exponential Model, User´s guide, Originlab, Northampton, Verfügbar auf:
<<http://www.originlab.com/www/helponline/Origin/en/UserGuide/ExpDec1.html>> letzter Aufruf am 07.02.2013.
- PERKINS, B. (2010), Have You mapped your data today? In: *Computerworld Online*, Louisville, Verfügbar auf:
<http://www.computerworld.com/s/article/350588/Have_You_Mapped_Your_Data_Today_>
letzter Aufruf am 08.02.2013.
- R (1997), The R Project for Statistical Computing (online) Verfügbar auf:
<<http://www.r-project.org>>
letzter Aufruf am 07.02.2013.

- SACHS, L. & J. HEDDERICH (2009), *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 13th ed. Springer Verlag: Heidelberg, 122.
- SCHNEEVOIGT, N. J. & van der LINDEN, S. & THAMM, H. (2008), Detecting Alpine landforms from remotely sensed imagery. A pilot study in the Bavarian Alps – In: *Geomorphology*.-93, 104 — 119.
- SCHUMANN, H. & W. MÜLLER (2000), *Visualisierung: Grundlagen und allgemeine Methoden*, Springer, Berlin, 370.
- TARAMELLI, A. & MELELLI, L. (2008), Detecting alluvial fans using quantitative roughness characterization and fuzzy logic analysis. – In: *Computational science and its applications - ICCSA, Part I*, 1-15.
- TYRALLOVÁ, L. (2011), Automated object detection of climate tracers in remote-sensing data – In: *Proc. SPIE 8174, SPIE Remote Sensing, Prague, 19-22 September 2011, vol. 8174, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*, doi:10.1117/12.898111.
- TYRALLOVA, L. & J. GONSCHOREK (2012), Spatio-Explorative Analysis and its Benefits for a GIS-integrated Automated Feature Identification. In: Murgante, B., Gervasi, O., Misra, S., Nedjah, N., Rocha, A.M., Tanar, D. & B. Apduhan eds., *12th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2012) Salvador da Bahia, 18-21 Jun 2012, Part II LNCS 7334*, Springer, Berlin/Heidelberg, 220-233.
- TYRALLOVÁ, L. & H. SCHERNTHANNER & S. van GASSELT (2011), Identifikation von Klimaprozessen durch automatisierte Objektidentifikation isolierter Oberflächenmorphologien – In: Strobl, J., Blaschke, T. & G. Griesebner, eds., *Angewandte Geoinformatik 2011. Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg, 6-8 Jul 2011*. Universität Salzburg. Heidelberg. 605-614.
- USGS Landsat (2013), *USGS Landsat Missions*. – Web:
<<http://landsat.usgs.gov/>>

letzter Aufruf am 11.03.2013.

WASHBURN, A. L. (2003), *Geocryology, a survey of periglacial processes and environments*, Edward Arnold, London, England, 406.

YERSHOV, E.D. (1998), *General Geocryology, studies in polar research*. Cambridge University Press, Cambridge, London, 580.

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*. – In: *Polar Geography* 23, 132-154.

Datenträger

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass diese Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Mittel angefertigt wurde. Diese Dissertation ist bisher nicht veröffentlicht. Sie wurde an keiner weiteren Hochschule eingereicht.

Ort, Datum

Lucia Tyrallová