

1. Abstract

Pakistans Gebirgslandschaft hat mit mehr als 7000 Gletschern ein reiches Vorkommen an Gletscherressourcen, welche als sensible Indikatoren für Klimaveränderungen gelten. Diese bilden sowohl eine wichtige Süßwasserquelle über ein großes Flussnetz als auch eine Bedrohung für die an den Flussumfern lebende Bevölkerung durch Überflutungen infolge vom Abschmelzen der Eismassen. Ein engmaschiges Monitoring der Veränderungen der Gletschermassen in dieser Region ist aus dieser Sicht daher unablässig und soll innerhalb der vorliegenden Projektarbeit einen Beitrag dazu leisten. Diese Projektarbeit nutzt Landsat 8 OLI/TIRS Szenen aus dem Ende der Ablationsphase innerhalb des Beobachtungszeitraumes 2014-2020, um eine Klassifikation der Gletscherklassen Schnee, Eis und Debris des Batura Gletschers (Pakistan) vorzunehmen. Für die Methodik wurde auf Grundlage von verschiedenen Band Ratio und Schneeeindizes das *Semi-Automatic Plugin (SCP)* in der Softwareumgebung *QGIS* verwendet, welche auf einer Per-Pixel Klassifikationsmethode im Zusammenhang mit dem *Maximum Likelihood* Algorithmus basiert. Ziel dieser Arbeit ist zum einen die Detektion der Veränderungen der Gletschermerkmale (Klassenanteile, Eisstromtermini) und zum anderen die Überprüfung der Eignung des *SCP* für diese Zwecke.

2. Grundlagen der optischen Fernerkundung von glazialen Gebieten

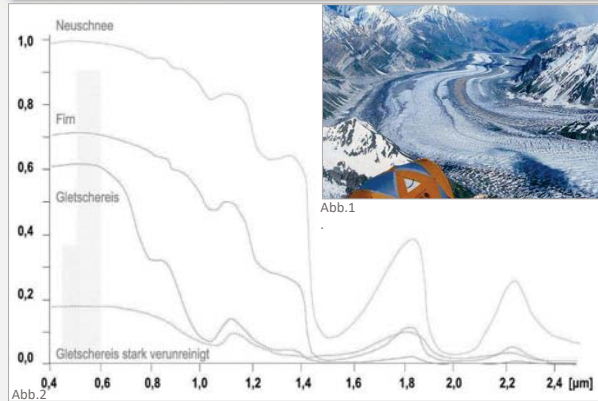


Abb.1. Untersuchungsgebiet Batura Gletscher, Pakistan. Er misst eine Länge von etwa 57km (Stand Oktober 2013) und ist damit eine der längsten Gletscher außerhalb der Polar Region in den mittleren und niedrigen Breiten. Geografisch erstreckt er sich in Nord Pakistan von 36°30'N bis 36°40'N und 74°22'33"E bis 74°52'30"E und deckt ein Höheniveau von ca. 2.516 m ü.M., bis zum höchsten Gipfel, den Batura Sar, von 7.795 m ü.M. ab. (Bildquelle: Google Earth Pro) Abb.2. Zeigt die Spektrale Signatur der verschiedenen Schneemetamorphosestadien. (Quelle: Markus Vollmann 2007)

Die verschiedenen Materialien einer Gletscherzone, wie Schnee, Eis und Schutt (*Debris*) besitzen unterschiedliche optische Eigenschaften in verschiedenen Bereichen des Elektromagnetischen Spektrums, wobei das Vermögen von Transmission, Reflexion und Absorption der elektromagnetischen Strahlung die Basis für eine fernerkundungsgestützte Gletscherkartierung und Klassifizierung bilden. Die unterschiedlichen Eigenschaften glazialer Merkmale beruhen in erster Linie auf der Metamorphose von Schnee zu Eis, also in der Veränderung der Korngröße und -form, und dem Anteil an flüssigem Wasser. Weitere Parameter wie der Verschmutzungsgrad, Anisotropie, atmosphärische, astronomische und orografische Faktoren können die Albedo von Schnee und Eis beeinflussen. Das Reflexionsvermögen von Schnee und Eis nimmt durch die Metamorphose der Korngröße allmählich sowohl im VIS (0,4 µm - 0,7 µm) als auch im nahen (NIR, 0,78 µm - 1,4 µm) und mittleren Infrarot (SWIR, 1,4 µm - 3 µm) ab. *Debris* besitzt gänzlich andere Eigenschaften als Schnee und Eis und reflektiert mit sehr geringer Intensität. Für eine Differenzierung zwischen einer supraglazialen Schuttauflage und umliegenden Umgebungsgestein bietet die spektrale Signatur keine hinreichende Funktion mehr als Analysewerkzeug und erfordert die Hinzunahme weiterer Daten, wie bspw. eine Temperaturkarte.

3. DATEN, METHODIK UND WORKFLOW

3.1. DATEN

Für die Projektarbeit wurden neben einem Digitalen Geländemodell (SRTM - void filled (2012)) und der von *GLIMS* bereitgestellten Outline des Batura Gletschers fünf Szenen der *Landsat 8 Mission OLI/TIRS* zwischen 2014-2020 verwendet, aus der Collection 2/Level 2, die das Untersuchungsgebiet mit einer maximalen Wolkenbedeckung von 10% zeigen. Der *Operational Land Imager (OLI)* Sensor verfügt über eine Auflösung von 30 m x 30 m und der *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* über 100m x 100 m und decken einen breiten Wellenlängenbereich vom VIS über das IR ab (Bänder 2-7, 10), der für die weiterführende spektrale Analyse der einzelnen Klassen Schnee, Eis und *Debris* notwendig ist. Die folgenden Arbeitsschritte sind in der Übersicht in Abb. 3. dargestellt.

3.2. METHODIK

Die Qualität der Bilder erforderte im *Preprocessing* aufgrund der hohen Qualität nur wenige Anpassungen mittels der Atmosphärischen Korrektur *TOA (Top of the Atmosphere)* und *BT (Brightness Temperature)*, auf dessen Basis zur Detektion von supraglazialer Debris eine *LST (Land Surface Temperature)* Karte erstellt werden konnte. Als weitere Analysehilfen wurden verschiedene *Color Composites* (RGB 5-4-3), *Band Ratio* (Red/SWIR) und einige Indizes (*NDSI - Normalized Difference Snow Index, NDSTI - Normalized Difference Snow Thermal Index*) angewandt, um die fundamentalen spektralen Unterschiede zwischen den Klassen zu kontrastieren und atmosphärische sowie topografische Störfaktoren zu reduzieren. Die LST Karte kam speziell zur Detektion von supraglazialer *Debris* zum Einsatz, da diese aufgrund ihrer Lage auf dem Eis und ihrer damit verbundenen niedrigeren Temperatur im Vergleich zum lateralen Umgebungsgestein von dieser bis zu einem gewissen Grad unterschieden werden kann. Die Klassifizierung wurde dann mittels des *Semi-Automatic Plugins* in der *QGIS* Umgebung durchgeführt, welche auf der *supervised classification* Methode beruht. Innerhalb des Prozesses wird ein *Training Input* erzeugt, das über vom Bearbeiter festgelegte *ROI's (Region of Interests)* über die darin enthaltenen Pixelwerte jede Sub- und Makroklasse eindeutig bestimmt. Ein Pixel gehört genau dann zur Klasse x, wenn seine spektrale Signatur komplett in der spektralen Region (*ROI*) enthalten ist, die durch die Klasse x vorher definiert wurde. Um nicht jedes Pixel manuell auswählen zu müssen, stellt das *Plugin* verschiedene Tools, wie den *region growing* Algorithmus, zu Verfügung, der mehrere Pixel mit gleichen Werten in einer festgelegten *Minimum Distance* erfasst und der zugehörigen Klasse zuordnet. Als Algorithmus wurden der *Maximum Likelihood* Algorithmus gewählt, da dieser sich im Vergleich mehrerer Studien besonders für die Unterscheidung von Schnee zu anderen Gletscherterrainklassen eignet und sich von anderen Klassifikationsalgorithmen in seiner Qualität abhebt. Sind alle Pixel im Untersuchungsgebiet erfasst und die spektralen Signaturen korrekt ohne weitere Überschneidungen angepasst, wird die jeweilige Szene dann im Band Processing als eine neue Klassifikationsebene dargestellt, die jede Klasse mit einer ihr zugewiesenen Farbe repräsentiert. Im *Postprocessing* wurden die Klassifikationsergebnisse dann einem *Accuracy Assesment* (Genauigkeitsbewertung) unterzogen. Dieser Schritt ist essentiell und ordnet die Qualität der Ergebnisse anhand von definierten Genauigkeitsmaßen ein und bietet so mehr Transparenz in der Kommunikation der Resultate. Die finale Auswertung widmete sich dann der Gletschermerkmalsveränderungen im Bezug auf die drei Haupteisstromtermini, die für jedes Jahr gemessen und in Beziehung gesetzt wurde.

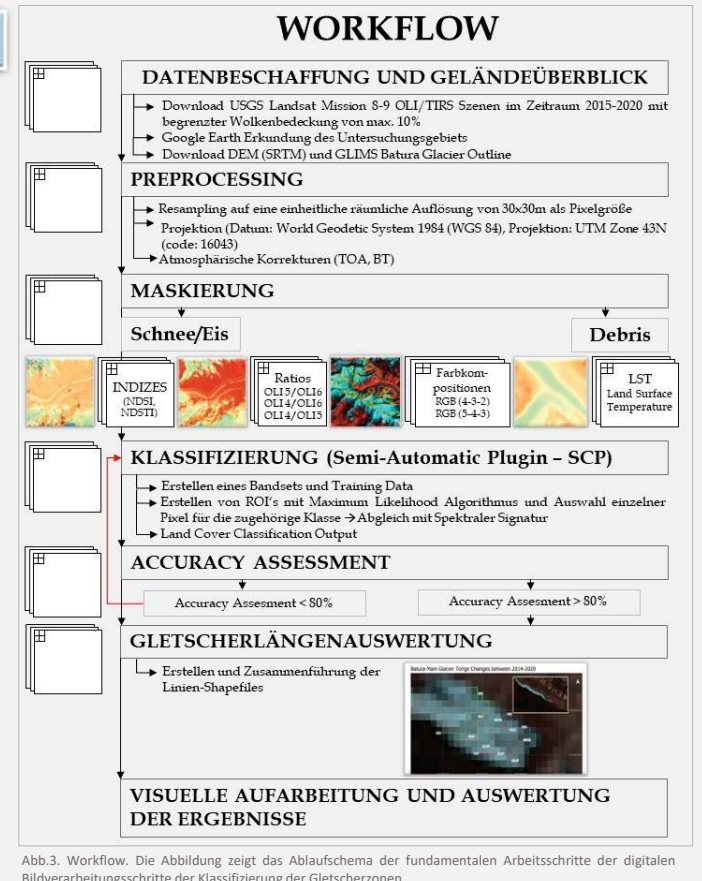


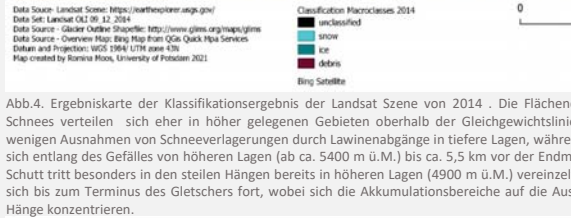
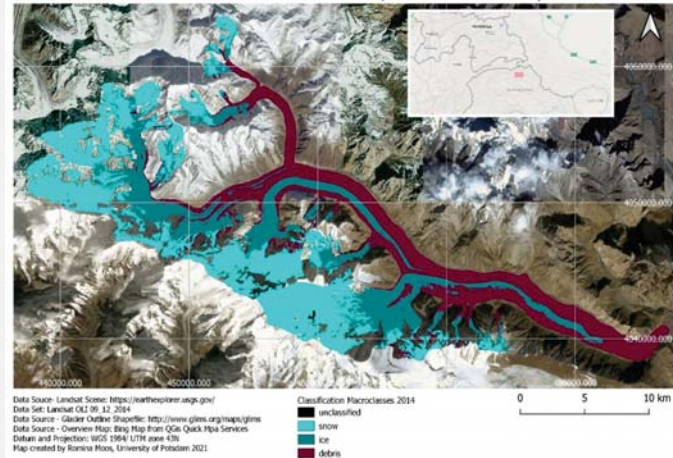
Abb.3. Workflow. Die Abbildung zeigt das Ablaufschema der fundamentalen Arbeitsschritte der digitalen Bildverarbeitungsschritte der Klassifizierung der Gletscherzonen

4. ERGEBNISSE

4.1. KLASIFIKATIONSERGEBNISSE

Die Ergebniskarten der Klassifikation sind Rasterbilder, wobei jeder Pixelwert mit einer Klassen ID korrespondiert und durch eine ihr spezifisch zugewiesene Farbe repräsentiert wird. Für alle Szenen im Beobachtungszeitraum konnte eine allgemeine Stagnation der Verteilung der Flächenanteile der Klassen Schnee, Eis und Debris festgestellt werden, da keine signifikanten Proportions- und Verteilungsänderungen der Klassenanteile zu verzeichnen waren (siehe Abb. 4 & 5). Lediglich die Szene von 2020 wies eine Abweichung auf, die zunächst eine Proportionsveränderung vermuten lässt, jedoch auf einen nicht behebbaren Klassifikationsfehler in einem inhomogenen ausgeleuchteten Bereich zurück zu führen ist. Das *Accuracy Assesment* ergab eine hohe Qualität der Klassifizierung jeder Szene, denn die Werte der Genauigkeitsmaße lagen zwischen 0.89 und 0.95 und somit im obersten Bereich der Bewertungsqualität. Daraus lässt sich schließen, dass die Klassifikation mit dem *SCP*, die zwar einer gewissen Subjektivität unterliegt, dennoch mit konstanten Bewertungsprinzipien durchgeführt wurde und für diese Methodik eine in sich geschlossene und vergleichbare Qualität der Klassifikationsszenen untereinander bietet.

Klassifikation der Makroklassen mit einer Landsat OLI/TIRS Szene von 2014, Batura Gletscher



4.2. VERÄNDERUNGEN DER EISTROMTERMINI

Die ermittelte Terminuslage der einzelnen Eisströme orientieren sich an den klassifizierten Ergebnisbildern der jeweiligen Landsat-Szenen und sind in der Übersicht in Tab. 1 aufgeführt. Eine Verbindung zwischen ihnen scheint nicht zu bestehen. Innerhalb des Beobachtungszeitraumes kam es am Terminus des am höchsten gelegenen Eisstromes 1 zum größten Vorstoß, wobei die Vorstoßlänge mit zunehmender Nähe zur finalen Grenze des Gletschers signifikant abnahm.

	2014 - 2015	2015 - 2017	2017 - 2018	2018 - 2020	Durchschnittliche Längenänderung 2014-2020 (m)
Eisstrom 1	+174,78	+376,36	+193,94	+355,32	+1102,6
Eisstrom 2	+175,78	+154,27	+150,27	+339,43	+821,6
Eisstrom 3	+54,26	+109,03	+61,69	+107,75	+332,73
durchschnittliche Längenänderung (in m)					

Tab.1. Ermittelte Längenänderungen für die 5 Landsat Szenen der 3 Eisströme des Batura Gletschers. Sie verlaufen schätzungsweise annähernd konstant für jedes Jahr. Die größten Vorstöße sind im oberen Teil des Gletschers bei dem Eisstrom 1 zu verzeichnen und nehmen allmählich nach unten hin, zum finalen Terminus bei Eisstrom 3, signifikant ab.

Allen drei Eisströmen ist gemein, dass jede Terminusverlagerung eine jährliche, relativ konstante Distanz vorrückt (Tab. 1). Damit zeigt die Dynamik der Längenänderung des Batura Gletschers eine dem Überwiegenden globalen Trend der Regression der Gletscherfronten gegenläufige Entwicklung. Die Veränderungen der Eiströme haben jedoch nur eine begrenzte Signifikanz, da ihre Dynamik auch von aklimatischen Faktoren beeinflusst wird, und können als einzelnes Merkmal nicht losgelöst von weiteren Parametern im Kontext Klimawandel eingordnet werden.

5. DISKUSSION UND FAZIT

Die Ergebnisse der Klassifikation zeigen im Hinblick auf die prozentuale Flächenverteilung der einzelnen Klassen keine signifikanten Veränderungen und verweilen innerhalb des beobachteten Zeitraumes von 2014-2020 in einem Status der Stagnation. Dies ist im Hinblick auf den globalen Trend einer allgemeinen Regression der Gletscherfronten in anderen Regionen überraschend. Auch die Variationen der Eistromtermini dienen zwar häufig als offensichtlichster Indikator für den Klimawandel, jedoch kann allein daraus kein Trend abgeleitet werden. Insbesondere da Längenänderungen von wenigen hundert Metern bei einem Gletscher mit einer Ausdehnung von bis zu 60 km vernachlässigbar sind. Die Ursachen für derartige Dynamiken sind vielfältig und die die Massenbilanz sowie den Eistromvorstoß beeinflussenden Parameter müssten zur Validierung der Stagnation der Klassenflächen und der positiven Längenänderungen der Eistromtermini hierzu untersucht werden. Denn in der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine rein zweidimensionale Betrachtung der Veränderung (d.h. die Flächenerfassung ist geglättet und entspricht nicht der realen durch das vertikale Gefälle verzerrten Fläche). Die Hinzunahme von digitalen Geländemodellen für die einzelnen Szenen in Addition mit *in situ* Daten von Schneehöhen, könnten eine exaktere und dreidimensionale Abbildung der dynamischen Klassenflächenverteilung bzw. Klassenvolumina liefern. Die Methodik für die Detektion von supraglazialer Debris sollte in folgenden Projekten um mindestens eine weitere Methode erweitert werden. Denn eine Analyse nur auf der Temperaturkarte beruhend ist vor allem durch die Mächtigkeit der lateralen Schuttablagerungen begrenzt, deren Schichtdicke entscheidend dafür ist, wie viel vom Kältereservoir der möglicherweise darunterliegenden Eisschicht an der Oberfläche zu messen ist. Die Anwendbarkeit des *SCP's* wird innerhalb dieser Arbeit als begrenzt eingestuft. Es eignet sich eher für *Land Cover Classification* mit Klassen, deren spektralen Signaturen gut differenzierbar sind. Besonders in Bereichen mit inhomogener Ausleuchtung der Topografie kam es infolge dessen innerhalb der spektralen Signaturen der Klassen zu teilweise nicht behebbaren Überschneidungen. Alternativ könnten in künftigen Untersuchungen passive Daten wie Radarbilder zum Einsatz kommen um solche Schlagschattenbereiche zu eliminieren. Auch die Heterogenität der Klassen innerhalb eines Pixel könnte mittels einer Sub-Pixel Klassifikation unter Verwendung einer *spectral unmixing* Methode exaktere Flächenergebnisse für jede Klasse erfassen. Die Ergebnisse der Arbeit sind trotz des subjektiven Auswertungscharakters mit Ergebnissen anderer Publikationen (vgl. Iturrizaga 2011; Gao et al. 2020) vergleichbar. Um die Veränderungen jedoch im klimatischen Kontext einordnen zu können, sollte allerdings ein breit gefasster Beobachtungszeitraum gewählt werden. Die Ergebnisse von Langzeitmonitoringprogrammen sind nicht zuletzt aufgrund ihrer Bedeutung für hydrologische Modellierungen und Prognosen, insbesondere für die Einschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit, von dringlichem Belang.

Quellen: (1) Paul et al. (2004): Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers (2) Vollmann, M. (2007) : Die Kartierung der Schnee- und Eisbedeckung aus Satellitenbildern zur Validierung von Schneeschmelzmodellen in kleinen und mittleren Einzugsgebieten der Hohen Tauern – Salzburg (3) Arora et al. (2011): Digital Image Information Extraction Techniques for Snow Cover Mapping from Remote Sensing Data (4) Iturrizaga, L.(2011): Trends in 20th century and recent glacier fluctuations in the Karakoram Mountains (5) Singh et al. (2011): Hyperspectral analysis of snow reflectance to understand the effects of contamination and grain size (6) Haq et al. (2012): Development of New Thermal Ratio Index for Snow/Ice Identification (7) Rastner, P. (2014): The local glaciers and ice caps on Greenland: their mapping, separation from the ice sheet and their climate sensitivity (8) Schapman et al. (2015): Grundlagen der Fernerkundung. Image Classification (9) Prinz, T. (2017): Digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften. 3.5. Spektralanalysen (10) Mölgl et al. (2018): A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: distribution of debris cover and mapping challenges (11) Siegmund (2018): Gletscher-Monitoring in Pakistan. Online verfügbar unter: <https://www.kfw.de/stories/umwelt/klimawandel/gletschermonitoring-pakistan/> (12) Congedo, Luca (2020): Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 7.0.0.1 Luca Congedo (13) Gao et al. (2020): Post-20th century near-steady state of Batura Glacier: observational evidence of Karakoram Anomaly (14)Muster, P. (2021): Material Schnee - Optische Eigenschaften.