

# Risikoanalyse der Gletscherseen im Kumbeltal, nördlicher Tien Shan (Kasachstan)



**Masterarbeit**

**(Geo 511)**

von

**Katharina Zimmermann**

BSc in Geographie

08-922-197

Betreut durch

**Dr. habil. Tobias Bolch**

Institutsvertreter

**Prof. Dr. Andreas Vieli**

Eingereicht: 27. Februar 2015

Titelbild: Die Gletscherseen Gorelnik (links) und Sovetov (rechts) im oberen Kumbeltal, welche Gegenstand der Untersuchung in dieser Arbeit waren. (Foto: eigene Aufnahme)

## Danksagung

Diese Arbeit gelang dank dem Beitrag verschiedenster Personen, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte. Im speziellen möchte ich folgenden unmittelbar involvierten Personen meinen Dank aussprechen:

Meinem Betreuer Dr. habil. Tobias Bolch ohne dessen Offenheit dieses Projekt nicht hätte durchgeführt werden können. Sehr schätzenswert und nicht selbstverständlich war auch sein immer offenes Ohr für jegliche Probleme die sich während der Arbeit stellten. Ganz grossen Dank für die Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit. Bedanken möchte ich mich auch für die zur Verfügung gestellten wertvollen Daten, die ich so in meine Arbeit integrieren konnte.

Grossen Dank geht auch an alle Personen des Geographischen Institutes des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan, welche mich bei meinem Aufenthalt in Kasachstan unterstützt haben. Im speziellen möchte ich gebührenden Dank an Dr. Prof. Victor Blagovechshenskiy des Geographischen Institutes des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan aussprechen, der die Feldarbeit in Kasachstan mitermöglichte und grosse organisatorische Arbeit geleistet hat. Herzlichen Dank geht auch an seine Frau. Durch den zuvorkommenden Einsatz der Beiden konnte ich einen Einblick in die Gebirgsregion um Almaty erhalten und wurde gut verköstigt. Grossen Dank geht auch an Vitali (Geographischen Institutes des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan) der sich trotz grosser Sprachbarriere spontan bereit erklärt hat, mich bei der Feldarbeit zu unterstützen und als Bergführer mich sicher durch das Gelände geführt hat. Bedanken möchte ich mich auch beim Direktor Medeu Akhmetkal Rakhmetullayevich des Geographischen Institutes des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan, welcher sich für ein Gespräch Zeit genommen hat und die Unterstützung meiner Arbeit zugesagt hat. Bedanken möchte ich mich auch für die zur Verfügung gestellten Daten, welche wertvoll für meine Arbeit waren.

Большое спасибо!!

Besten Dank geht auch an Kriti Mukherjee für das Berechnen des Höhenmodelles aus den GeoEye Daten. Ein herzliches Dankeschön geht nicht zuletzt auch an die Studienkollegen und Studienkolleginnen welche dafür sorgten, dass gelegentliches gedankliches Durcheinander wieder seine Ordnung fand.

## Zusammenfassung

Zwei Gletscherseen im oberen Teil des Kumbeltales im nördlichen Tien Shan (Kasachstan) wurden auf ihr Ausbruchspotential untersucht und die Gefährdung sensibler Gebiete durch einen Ausbruch über eine Risikoanalyse abgeschätzt. Speziell wurde auch das Potential eines Eisabbruches oder Felssturzes als Ausbruchsmechanismus evaluiert. Im Fokus der Risikoanalyse standen die beiden Fragen zur maximalen Reichweite und zu betroffenen sensiblen Gebieten. Dabei wurde der Weg eines worst-case Szenarios gewählt. Die Analyse wurde sowohl für die aktuelle als auch für die mögliche zukünftige Situation durchgeführt.

Die Ausbruchsgefährdung wurde qualitativ über verschiedene Schlüsselkomponenten und -Indikatoren evaluiert. Ergebnisse der Feldbegehung unterstützten die Evaluation. Trotz der hohen Subjektivität der Methodik zeigte sich, dass diese Subjektivität wichtig ist, um eine an das Fallbeispiel angepasste Abschätzung zu erhalten. Die Abschätzung ergab eine mittlere bis hohe Ausbruchsgefährdung für den See Sovetov und eine tiefe Ausbruchsgefährdung für den Gorelniksee für die aktuelle Situation. Mit Blick in die Zukunft unter veränderten klimatischen Bedingungen zeigt der See Sovetov das Potential zur hohen, der Gorelniksee eine mittlere bis hohe Ausbruchsgefährdung. Der Ausbruch beim See Sovetov wird am ehesten durch Seespiegelerhöhung infolge intensiver Niederschläge gesehen und dadurch rückschreitende Erosion am Oberflächenabfluss. Beim Gorelniksee liegt ein hohes Potential beim Seeimpakt durch eine Eislawine vor und ein dadurch verursachtes Overtopping und Erosion des Moränendamms.

Die maximale Reichweite wurde über empirisch-statistische Beziehungen als auch über die Modellierung mit den Modellen MSF und RAMMS abgeschätzt. Die empirisch-statistischen Beziehungen zeigten, dass eine hohe Unterschätzung der maximalen Reichweite möglich ist. Bei der Modellierung wurde für die Parameterkalibration von RAMMS und die Definition kritischer Neigungswerte beim MSF in einem ersten Schritt eine Back-Analyse der Ereignisse 1977 und 2006 vorgenommen. Basierend auf den Ergebnissen wurden in einem zweiten Schritt Ausbruchsszenarien erstellt und eine prognostische Modellierung durchgeführt. Die Modellierung und dadurch die Ergebnisse mit RAMMS und MSF zeigten hohe Unsicherheiten, welchen durch eine grosse Anzahl Modellläufen, eine Sensitivitätsanalyse und durch zellbasierte Statistiken begegnet wurde. Die Unsicherheiten bei RAMMS lagen vor allem a) im Ziel der Prognose b) in der Schwierigkeit der Prozessabbildung eines GLOF (glacial lake outburst flood = Hochwasser bzw. Murgang durch einen Gletscherseeausbruch) im Model und dadurch vereinfachenden Annahmen beim definierten Abflussvolumen und maximalen Abfluss sowie c) in der geringen Datengrundlagen. Die hohe morphologische und topographische Variabilität und eine insgesamt lange Abflussstrecke war eine zusätzliche Herausforderung in der Modellierung. Die Unsicherheiten beim MSF Modell lagen vor allem darin, dass „nur“ verschiedene kritische Neigungswinkel getestet werden konnten ohne Miteinbezug veränderter Startbedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Murgang durch einen Gletscherseeausbruch das Potential hat, mindestens den Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und möglicherweise sogar den Murenschutzdamm vor der Stadt Almaty zu erreichen.

Die Evaluation eines Eis- oder Felsabbruches als Trigger für einen Seeausbruch erfolgte ebenfalls über den Modellierungsweg mit RAMMS und MSF. Es wurden potentielle Fallwege modelliert und auf einen Seeimpakt evaluiert. Beide zeigten vergleichbare Resultate und vor allem mit Blick in die Zukunft das Potential zum Seeimpakt für beide Seen. Der Gorelniksee weist dabei das grössere Potential für einen Ausbruch durch einen Seeimpakt auf. Wie für die qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung erwies sich die Feldarbeit als wertvolle Unterstützung für eine bessere Ergebnisinterpretation.

Die Analyse der Anwendbarkeit der verwendeten Modelle RAMMS und MSF zeigte, dass sie für Gebiete mit wenig Datengrundlage und erschwerter Zugänglichkeit, wie in diesem Fallbeispiel, die Tendenzen gut abbilden können und sich ergänzenden Eigenschaften aufweisen, welche die Interpretation der Ergebnisse und die Risikoanalyse unterstützen. Keines der beiden zeigte aber einen entscheidenden Mehrwert gegenüber dem anderen auf für den hier möglichen Detailgrad der Analyse. Aufgrund der Ergebnisse der Risikoanalyse wird hier die Untersuchung des Moränendamms beim See Sovetov auf eishaltigen Permafrost als wichtiger weiterer Schritt angesehen. Für Risikomindernde Massnahmen werden hier der Aufbau eines Frühwarnsystems oder mindestens der Monitoringkomponente eines Frühwarnsystems und die lokale Gefahrensensibilisierung als Möglichkeiten in Betracht gezogen. Die Arbeit zeigte auch die Limiten und Herausforderungen der hier verwendeten Methoden für die Risikoanalyse auf, wenn nicht viel Information und Wissen über das Untersuchungsgebiet vorhanden ist. Der Miteinbezug von Expertenwissen ist ein wichtiger Schritt für aussagekräftige Resultate und sollte in einem nächsten Schritt integriert werden

## Abstract

Two proglacial lakes in the upper part of the Kumbel valley in the northern Tien Shan (Kazakhstan) were analysed for their potential to break out. Furthermore a risk analysis was carried out to determine if a glacial lake outburst flood (GLOF) from these lakes potentially endangers sensitive regions downstream. Special focus was given to the breakout of the lakes through an ice or rock avalanche as the triggering factor. For the risk analysis, the potential maximum reach of a glacial lake outburst flood was analysed to determine if there is a danger to sensible infrastructure or to human life. The analysis was carried out with a view of a worst-case scenario for the current situation, as well as for the potential future situation.

The evaluation of the potential for an outburst was carried out qualitatively. Different indicators and key components were evaluated. Results from fieldwork supported the evaluation. Despite the high subjectivity of this method, this subjectivity was found to be necessary to arrive at an appropriate evaluation for individual case studies. The evaluation regarding the current situation indicates a middle to high potential for the lake Sovetov, and a low potential for the lake Gorelnik. Regarding the future situation under ongoing climate change, the potential for an outburst of lake Sovetov was found to be high, and the potential for an outburst of lake Gorelnik middle to high in case of volume increase. The most likely trigger for the lake Sovetov is the rise of the lake level due to intense precipitation events, and thus retrogressive erosion in the morainic material at the superficial outflow channel. The situation at the lake Gorelnik shows a high potential for an impact wave due to an ice avalanche, and thus overtopping and erosion of the morainic dam.

The maximum reach was estimated by empirical-statistical relationships and by a modelling approach with the models MSF and RAMMS. The chosen empirical-statistical relationships showed that this modelling approach can greatly underestimate the maximum reach. For the parameter calibration for RAMMS and the definition of critical slope angles for MSF, a back-analysis of the events 1977 and 2006 was carried out. Based on these results, scenarios for a lake outburst were created and a prognostic modelling was done for the current and possible situation in the future. The modelling and thus the results with RAMMS and MSF were highly uncertain. To reduce the degree of uncertainty a high amount of modelling runs were calculated, and a sensitivity analysis as well as cell-based statistics were carried out. For RAMMS, uncertainty was produced by a) the aim of a forecast, b) the difficulties of the reproduction of the processes of a GLOF in the model requiring simplifying assumptions for the defined maximum discharge and volume of the flood, and c) the low data basis. The highly variable morphological and topographical characteristic and the long distance downvalley brought additional challenges. The use of "only" different critical slope angles in the modelling with MSF, and the inability of the integration of changed initial condition brought the main uncertainties into the MFS modelling approach. The results showed that a debris flow caused by a lake outburst has, at a minimum, the potential to reach the confluence with the river Prochodnaja, and perhaps even the potential to reach the protective dam shortly before the city Almaty. The evaluation of an ice or rock avalanche as the trigger for a lake outburst was also done by modelling with RAMMS and MSF. Potential fall lines were modelled and evaluated for a lake impact. Both models showed similar results, and especially for the

future situation, the potential for a lake impact for both lakes was shown. The lake Gorelnik has the higher potential for an outburst through a lake impact. As for the qualitative approach, the fieldwork was a valuable support for a better result interpretation.

The analysis of the application of the used models RAMMS and MSF showed that the models indicate the tendencies well. They can be used for regions as in this case study, where the data basis is low and fieldwork is difficult. They offer complementary characteristics, which can support the interpretation of the results and the risk analysis. But neither RAMMS nor MFS shows additional benefit at this possible level of detail. In view of the results of the risk analysis, the investigation of the morainic dam for ice content at lake Sovetov is considered as a next important step. For risk reduction, the development of a full early warning system, or, at a minimum, the monitoring component of an early warning system is a possible suggestion, as well as an increase in local sensitisation for the possible hazard. This work showed also the limits and difficulties for the used methods for a risk analysis, when there is not much information and knowledge about the study area. Local expert knowledge is important for appropriate results, and should be integrated as a next step.

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Einleitung</b> .....                                      |    |
| <b>1. Untersuchungsgebiet</b> .....                          | 17 |
| 1.1 Lage .....   | 17 |
| 1.2 Das Klima und der Klimawandel.....                       | 18 |
| 1.3 Die Permafrostverteilung und Permafrostentwicklung ..... | 21 |
| 1.4 Die Gletscher und Gletscherentwicklung .....             | 23 |
| 1.5 Naturgefahren .....                                      | 24 |
| 1.6 Die Entwicklung von Gletscherseen .....                  | 26 |
| 1.7 Talzonierung für Murgänge .....                          | 31 |
| 1.8 Siedlung und Infrastruktur .....                         | 31 |
| <b>2. Was ist eine Risikoanalyse?</b> .....                  | 33 |
| 2.1 Begriffsdefinition Risiko.....                           | 33 |
| 2.2 Allgemeine Bestandteile einer Risikobetrachtung .....    | 33 |
| 2.3 Risikoanalyse .....                                      | 34 |
| 2.4 Herausforderungen für Prognosen .....                    | 35 |
| <b>3. Abflussmodelle für die Risikoanalyse</b> .....         | 37 |
| 3.1 Modified-Single-Flow Modell (MSF).....                   | 37 |
| 3.2 Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS).....              | 38 |
| <b>4. Daten</b> .....  | 40 |
| 4.1 Fernerkundungsdaten .....                                | 40 |
| 4.1.1 SRTM DHM .....   | 40 |
| 4.1.2 ASTER GDEM Version 2 .....                             | 40 |
| 4.1.3 GeoEye DHM .....                                       | 41 |
| 4.1.4 Satellitendaten .....                                  | 41 |
| 4.2 Bathymetrische Daten.....                                | 41 |
| 4.3 Temperatur- und Niederschlagsdaten Tuyuksu .....         | 42 |
| 4.4 Daten aus der Feldarbeit.....                            | 42 |
| 4.5 GIS-Daten zum Untersuchungsgebiet .....                  | 43 |
| <b>5. Qualitätsanalyse der Höhenmodelle</b> .....            | 44 |
| 5.1 Repräsentation der aktuellen Topographie .....           | 44 |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 5.1.1     | Aufnahmedatum .....  | 44        |
| 5.1.2     | Auflösung.....   | 45        |
| 5.2       | Höhenfehler.....   | 46        |
| 5.2.1     | Fehlerkarte .....  | 46        |
| 5.2.2     | Scatterplot .....  | 47        |
| 5.2.3     | Vergleich mit GPS Daten.....   | 48        |
| 5.2.4     | Höhenkorrelation und Häufigkeitsverteilung.....                                | 49        |
| 5.3       | Neigungsfehler .....   | 50        |
| 5.4       | Artefakte.....   | 51        |
| <b>6.</b> | <b>Methoden .....</b>  | <b>53</b> |
| 6.1       | Feldarbeit .....   | 53        |
| 6.2       | Modellbasierte Abschätzung eines Eis-Felsabbruches als Triggermechanismus..... | 53        |
| 6.2.1     | Gebietsausscheidung.....   | 53        |
| 6.2.2     | Modellierung mit MSF und RAMMS.....  | 54        |
| 6.2.3     | Abbruchszzenarien für Eis- und Felsabbrüche.....                               | 55        |
| 6.3       | Qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung.....                           | 56        |
| 6.3.1     | Triggermechanismen.....  | 56        |
| 6.3.2     | Verwendete Schlüsselkomponenten und Auswertungsschema.....                     | 58        |
| 6.4       | Abschätzung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches.....                  | 59        |
| 6.4.1     | Empirisch-Statistisch Abschätzung.....   | 60        |
| 6.4.2     | Modellbasierte Abschätzung mit MSF.....  | 60        |
| 6.4.3     | Ausbruchsszenarien für die MSF Modellierung .....                              | 61        |
| 6.4.4     | Modellbasierte Abschätzung mit RAMMS .....                                     | 61        |
| 6.4.5     | Ausbruchsszenarien für RAMMS für die aktuelle und zukünftige Situation .....   | 70        |
| <b>7.</b> | <b>Ergebnisse und Auswertung.....</b>  | <b>72</b> |
| 7.1       | Kalibrationsergebnisse RAMMS .....   | 72        |
| 7.1.1     | Reibungskoeffizienten.....   | 72        |
| 7.1.2     | Unsicherheiten .....   | 73        |
| 7.2       | Simulationsergebnisse MSF.....   | 75        |
| 7.2.1     | Neigungskriterium .....  | 75        |
| 7.2.2     | Unsicherheiten .....   | 75        |
| 7.3       | Modellbasierte Abschätzung eines Eis-Felsabbruches als Triggermechanismus..... | 78        |

|   |            |
|---|------------|
| 7.3.1 Modellresultate .....   | 78         |
| 7.3.2 Unsicherheiten .....  | 79         |
| 7.3.3 Gefährdungspotential .....  | 79         |
| 7.4 Qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung.....                      | 83         |
| 7.5 Empirische Berechnung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches .....  | 85         |
| 7.6 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches mit RAMMS ..... | 87         |
| 7.6.1 Ausbruch ab der Murgangrinne .....                                      | 87         |
| 7.6.2 Ausbruch ab dem See.....  | 87         |
| 7.6.3 Unsicherheiten .....  | 88         |
| 7.6.4 Gefährdungspotential .....  | 89         |
| 7.7 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches mit MSF .....   | 94         |
| 7.7.1 Ausbruch ab dem See.....  | 94         |
| 7.7.2 Unsicherheiten .....  | 95         |
| 7.7.3 Gefährdungspotential .....  | 95         |
| <b>8. Diskussion .....</b>  | <b>98</b>  |
| 8.1 Kalibration von RAMMS .....   | 98         |
| 8.2 Simulation mit MSF .....  | 99         |
| 8.3 Repräsentativität der Realität .....                                      | 100        |
| 8.4 Eis-Felsabbruch als Triggermechanismus.....                               | 101        |
| 8.5 Qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung.....                      | 102        |
| 8.6 Empirische Abschätzung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches ..... | 104        |
| 8.7 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches.....            | 104        |
| 8.8 Verwendete Höhenmodelle .....   | 107        |
| 8.9 RAMMS versus MSF.....   | 108        |
| 8.10 Prognostische Modellierung von Gletscherseeausbrüchen.....               | 109        |
| 8.11 Risikoanalyse .....  | 111        |
| 8.12 Risikomanagement.....  | 112        |
| <b>9. Synthese und Ausblick.....</b>  | <b>114</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>117</b> |
| <b>Anhang .....</b>   | <b>125</b> |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabelle 1:</b> Prognostizierte Entwicklung einiger Naturgefahren in Gebirgsregionen..... Einleitung   |    |
| <b>Tabelle 2:</b> Murgangvolumen und Abfluss durch Niederschläge und Gletscherseeausbrüche im Ile Alatau .....   | 26 |
| <b>Tabelle 3:</b> Bathymetrische Daten zum See Sovetov .....   | 28 |
| <b>Tabelle 4:</b> Mittlerer, maximaler und minimaler Höhenfehler vor und nach der Koregistration sowie die Standardabweichung des Fehlers .....  | 47 |
| <b>Tabelle 5:</b> a) Höhenwerte im SRTM, ASTER und GeoEye Höhenmodell an den GPS Koordinatenpunkten und die Höhenwerte der GPS Messungen selber b) Höhenwertdifferenzen zwischen den Höhenmodellen ASTER GDEM, SRTM DHM und GeoEye sowie zu den GPS Punkten..... | 48 |
| <b>Tabelle 6:</b> Differenzenstatistik aus den erhaltenen Werten aus Tabelle 3b. Das GeoEye ist in Bezug zu den GPS Daten am genauesten. Relativ sind die beiden Höhenmodelle ASTER GDEM und SRTM DHM am besten.....   | 49 |
| <b>Tabelle 7:</b> Auswertungsschema für die qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung der Seen Sovetov und Gorelnik .....  | 58 |
| <b>Tabelle 8:</b> Bewertungsschlüssel für die qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung der Seen Sovetov und Gorelnik .....  | 59 |
| <b>Tabelle 9:</b> Gewählte kritische Neigungswerte für die Ausbruchmodellierung mit dem MSF Modell   | 61 |
| <b>Tabelle 10:</b> Berechnete zukünftige Volumina für den See Sovetov über empirisch-statistische Beziehungen und deren Abweichung zum Mittel als Mass der Unsicherheit.....   | 63 |
| <b>Tabelle 11:</b> Berechnete maximale Abflüsse für das Kalibrationsereignis 1977 sowie für die aktuelle und zukünftige Situation beim See Sovetov. Zusätzlich wurde die Abweichung zum Mittel als Mass der Unsicherheit berechnet .....                         | 65 |
| <b>Tabelle 12:</b> Wertepaarkombinationen der Reibungskoeffizienten in der Ausbruchmodellierung ab der Murgangrinne mit RAMMS .....  | 70 |
| <b>Tabelle 13:</b> Getestete Volumina und maximale Abflüsse in der Ausbruchmodellierung mit RAMMS  | 71 |
| <b>Tabelle 14:</b> Getestete Wertepaarkombinationen der Reibungskoeffizienten in der Ausbruchmodellierung ab dem See mit RAMMS.....  | 71 |
| <b>Tabelle 15:</b> Getestete Voluminas und maximale Abflüsse in der Ausbruchmodellierung ab dem See mit RAMMS. ....  | 71 |
| <b>Tabelle 16:</b> Wertebereiche der Reibungskoeffizienten $\mu$ und $\xi$ für die Szenarienmodellierung mit RAMMS.....  | 72 |
| <b>Tabelle 17:</b> Auswertung der qualitativen Abschätzung der Ausbruchsgefährdung der Seen Sovetov (a) und Gorelnik (b).....  | 83 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Abbildung 1:</b> Übersichtskarte zur Lage des Untersuchungsgebietes .....   | 17 |
| <b>Abbildung 2:</b> Kartenausschnitt zum Untersuchungsgebiet. ....   | 18 |
| <b>Abbildung 3:</b> Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Tien Shan und Untersuchungsgebiet ..  | 21 |
| <b>Abbildung 4:</b> Permafrostverteilung im Tien Shan und Untersuchungsgebiet .....  | 23 |
| <b>Abbildung 5:</b> Gletscherentwicklung des Tuyuksugletschers im Nachbartal des Untersuchungsgebietes von 1965-2010. ....   | 24 |
| <b>Abbildung 6:</b> Glabtop-Resultate für die potentielle Fläche und Tiefe der Seen Sovetov und Gorelnik   | 30 |
| <b>Abbildung 7:</b> Infrastruktur im Untersuchungsgebiet und gefährdete Gebiete für Naturgefahren .....  | 32 |
| <b>Abbildung 8:</b> Profil zwischen Gletscherseen und Murenschutzdamm vor der Stadt Almaty mit den drei unterschiedenen Zonen.....   | 32 |
| <b>Abbildung 9:</b> Bestandteile einer Risikobetrachtung mit den in dieser Arbeit behandelten Teilbereichen .....  | 34 |
| <b>Abbildung 10:</b> Evaluationsschema von Huggel et al. (2004) für die Risikoanalyse eines Gletscherseeausbruches.....  | 36 |
| <b>Abbildung 11:</b> Orthorektifizierte GeoEye-Aufnahme des oberen Teils des Untersuchungsgebietes mit Wolken und Wolkenschatten .....   | 41 |
| <b>Abbildung 12:</b> Bathymetrische Messungen vom Jahr 2013 und 2014 vom See Sovetov durch das geographische Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan .....  | 42 |
| <b>Abbildung 13:</b> Hillshade und Neigungskarte mit sichtbaren Artefakte (falsche Höhenangaben) aufgrund von Wolken und Wolkenschatten und korrigiertes Hillshade.....  | 45 |
| <b>Abbildung 14:</b> Abbildung des Murenschutzdammes (a), des seitlichen Murenschutzwalles (b) und der Kumbelbrücke (c) im ASTER GDEM und SRTM DHM. ....   | 46 |
| <b>Abbildung 15:</b> Höhendifferenzen ASTER GDEM – SRTM DHM in Meter a) Expositionsabhängigkeit der Höhenfehler vor der Koregistration b) Höhenfehler nach der Koregistration .....  | 47 |
| <b>Abbildung 16:</b> Korrelation zwischen den Höhenwerten des ASTER GDEM und des SRTM DHM im Untersuchungsgebiet.....  | 49 |
| <b>Abbildung 17:</b> Abbildung der Topographie im unteren, flacheren Teil des Untersuchungsgebietes. Ersichtlich ist die Überschätzung der Höhe im SRTM DHM bzw. die Unterschätzung im ASTER GDEM sowie die weicherer Topographie im SRTM DHM..... | 50 |
| <b>Abbildung 18:</b> Grösse der Neigungsfehler zwischen ASTER GDEM und SRTM DHM im Untersuchungsgebiet.....  | 50 |
| <b>Abbildung 19:</b> Kritische Gebiete für eine gute DHM Qualität. ....  | 52 |
| <b>Abbildung 20:</b> Beziehung zwischen mittlerer jährlicher Lufttemperatur und kritischem Reibungswinkel .....  | 55 |
| <b>Abbildung 21:</b> Potentielle Eisabbruchgebiete beim See Sovetov und Gorelniksee bei einer kritischen Neigung von 25° und 45° .....   | 55 |
| <b>Abbildung 22:</b> Werte für die Reibungskoeffizienten bei Eis-Felsstürze nach Hungr und Evans 1996..  | 56 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 23:</b> MSF Modellergebnisse des Ereignisses 1977. Bild a-c: Reichweite bei 6°, 8°, 11°.<br>Bild d: Einfluss der Auflösung auf die Wahrscheinlichkeitswerte und Reichweite im Vergleich bei 8°. Bild e: Einfluss der Wahl des Anrissortes auf die Reichweite und Wahrscheinlichkeitswerte bei 6° im Vergleich .....   | 77  |
| <b>Abbildung 24:</b> Potentielle Eisabbruchgebiete oberhalb des Gorelniksees und Geländecharakteristik zwischen Eisabbruch und See .....   | 81  |
| <b>Abbildung 25:</b> Potentielle Eis-Felsabbruchgebiete oberhalb des See Sovetov und Geländecharakteristik zwischen dem Eis-Felsabbruch und See .....  | 81  |
| <b>Abbildung 26:</b> Modellergebnisse mit MSF und RAMMS für die Bewegungswege potentieller Eis-Felsabbüche. a) Bewegungsweg mit dem MSF Modell für die aktuelle Situation für beide Seen b) Bewegungsweg mit dem MSF Modell für die zukünftige Situation für beide Seen c) Bewegungsweg mit dem ASTER GDEM für beide Seen gegenüber dem Resultat mit dem SRTM DHM gestellt für den See Sovetov. .... | 82  |
| <b>Abbildung 27:</b> Verhalten der Formel ( $1.9 \cdot V^{0.16} \cdot dH^{0.83}$ ) von Rickenmann (1999) über die Distanz für die Abschätzung der Reichweite eines Murganges. ....   | 86  |
| <b>Abbildung 28:</b> Sensitivität der Höhe auf das Volumen im SRTM DHM und ASTER GDEM .....  | 90  |
| <b>Abbildung 29:</b> Sensitivität des Höhenmodelles auf die Höhe im SRTM DHM und ASTER GDEM.....   | 90  |
| <b>Abbildung 30:</b> Sensitivität auf die Höhenmodelle und das Volumen .....   | 91  |
| <b>Abbildung 31:</b> Sensitivität auf die Reibungskoeffizienten. Alle Modellläufe des ASTER GDEM für das Volumen 3fach und 6fach im Vergleich.....   | 92  |
| <b>Abbildung 32:</b> Sensitivität der Wahl des Ausbruchsortes auf die Wahl des Höhnenmodelles .....  | 92  |
| <b>Abbildung 33:</b> Reichweite in Abhängigkeit der Wahl des Höhenmodells .....  | 93  |
| <b>Abbildung 34:</b> Modellergebnisse im oberen Bereich, mit ersichtlicher Aufstautendenz im Seebecken des ehemaligen Moränensees und vor der Murgangrinne. Die Tendenzen werden in allen Höhenmodellen gleich angegeben.....  | 93  |
| <b>Abbildung 35:</b> Modellerte Reichweite und Gefährdungswahrscheinlichkeit mit dem MSF Modell ab dem See: a) 6°, b) 8°, c) 11° mit dem Höhenmodell ASTER GDEM.....   | 96  |
| <b>Abbildung 36:</b> Modellerte Reichweite und Gefährdungswahrscheinlichkeit mit dem MSF Modell ab dem See: a) 6°, b) 8°, c) 11° mit dem Höhenmodell SRTM DHM.....   | 97  |
| <b>Abbildung 37:</b> Beispiel zur Repräsentation der Realität in RAMMS. Die Resultate stimmen mit den Gebieten in Yegorov (2007) relativ gut überein .....   | 101 |
| <b>Abbildung 38:</b> Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit der Warnung und der Reaktionszeit bzw. des Zeitpunktes der Warnausgabe.....   | 113 |

## Einleitung

Gebirge sind dynamische Systeme und Orte der extremen Wetter- und Klimaverhältnisse. Ereignisse wie Murgänge, Felsstürze, Hochwasser oder Lawinen sind ein natürlicher Ausdruck dafür und können nicht verhindert werden (Zschau und Küppers 2003). Zur Naturgefahr werden diese Prozesse erst im Kontext von anthropogenen Aktivitäten. Im Zuge der heutigen Zeit sind zwei Aspekte zentral für die Beurteilung der Entwicklung der Naturgefahren in Gebirgsregionen. Einerseits sind Gebirgsregionen wertvolle Regionen hinsichtlich verschiedener Aspekte wie Erholung, Gesundheit und Wirtschaft. Tourismus und Besiedlung dieser Gebiete erhöht die Verletzlichkeit der ansässigen Bevölkerung und Touristen gegenüber Prozessen wie Murgängen oder Felsstürzen und machen diese zu Naturgefahren. Andererseits sind Gebirgsregionen sehr sensitive Systeme, welche auf Veränderungen stärker reagieren (Kohler und Maselli 2009). Der Klimawandel hat daher vermutlich einen stärkeren Einfluss auf Gebirgsregionen und könnte zum vermehrten oder intensiveren Auftreten von Naturgefahren führen. Der Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Naturgefahren und dem Klimawandel wird von Studie zu Studie anders beurteilt und ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Gerade in Gebirgsregionen, in denen die klimatischen Verhältnisse eine natürlich hohe räumliche Variabilität aufweisen, ist eine Korrelation schwieriger festzustellen. Auch deswegen, weil viele aktuelle Prognosemodelle nicht für diese räumliche Skala konstruiert sind (Kohler und Maselli 2009). Die Klimaveränderung und Systemreaktionen werden mit grosser Wahrscheinlichkeit regional variieren. (OcCC Bericht 2007, IPCC 2012). Gemäss OcCC Bericht (2007) und auch nach Kohler und Maselli (2009) ist jedoch generell mit einem vermehrten Auftreten von Naturgefahren durch den Klimawandel zu rechnen (Tab. 1). Interessant für diese Arbeit ist die Trendabschätzung für Gletscherseeausbrüche welche als stark positiv bewertet wird.

Tabelle 1: prognostizierte Entwicklung einiger Naturgefahren im Gebirge. (Nach Kohler und Maselli 2009)

| Gefahr                     | Trend der erwarteten Änderung   | Vertrauen in die Trendprojektion | Gebiete, die am meisten betroffen sind          | Wirtschaftliche Bedeutung |
|----------------------------|---|----------------------------------|---|---------------------------|
| Erdbeben                   |  | hoch                             | Südamerika, Südasiens, Nord- und Zentralamerika | sehr hoch                 |
| Schneelawinen              |  | mittel                           | Nördliche Hemisphäre, Neuseeland                | tief                      |
| Trockenheit                |  | hoch                             | Afrika, Kaukasus, östlicher Himalaya            | hoch                      |
| Murgänge und Schlammströme |  | hoch                             | Südostasien, Zentral- und Südamerika            | mittel                    |
| Gletscherseeausbrüche      |  | hoch                             | Alle Regionen mit alpinen Gletschern            | tief                      |
| Hochwasser                 |  | mittel                           | Asien, Afrika, Nordamerika                      | hoch                      |
| Wald- und Buschfeuer       |  | mittel                           | Afrika, Nord- und Zentralamerika, Eurasien      | mittel                    |
| Krankheiten durch Insekten |  | mittel                           | Afrika, Südasiens, Zentral- und Südamerika      | mittel                    |

Im Kontext des Klimawandels ist in den letzten Jahrzehnten eine „neue“ Naturgefahr in den Fokus gerückt: Gletscherseen und deren Ausbruchgefährdung. (Horstmann 2004, Mergili et al. 2011) Der global beobachtete Klimawandel und der verstärkte Rückzug der Gletscher, insbesondere alpiner Gletscher (Quincey et al. 2007, Gardner et al. 2013), lässt viele Gletscherseen entstehen und wachsen (Wang et al. 2013, Narama et al. 2009a, 2009b, Westoby et al. 2014) (Abb1). Gletscherseen können je nach Charakteristik und Lokalität durch einen Ausbruch tiefer liegende Gebiete mit Infrastruktur und Siedlungen gefährden (Quincey et al. 2007, Wang et al. 2012a). Besonders für Gebiete nahe der vergletscherten Zone, welche von der lokalen Bevölkerung besiedelt oder touristisch genutzt werden, stellen Gletscherseen die Bevölkerung vor eine neue Gefahrensituation (Huggel et al. 2002, Wang et al. 2012a). Bei Gletscherseeausbrüchen steht innerhalb kurzer Zeit viel Wasser zur Verfügung, das viel Schuttmaterial mobilisieren kann. Dadurch entstehende Murgänge können ein beträchtliches Volumen erreichen und einen maximalen Durchfluss der mehrere Magnituden höher sein kann als der von Hochwasser (Worni et al. 2014). Gletscherseeausbrüche gehören daher zu den Naturgefahren mit oft hoher Zerstörungskraft. Ausserdem sind Gletscherseeausbrüche oft einmalige Ereignisse oder mit langem Zeitintervall, so dass die Bevölkerung wenig auf diese Gefahr sensibilisiert ist. (Clague und Evans 2000, Mergili et al. 2011)

Gletscherseeausbrüche haben weltweit in den letzten Jahrzehnten immer wieder zu verheerenden Katastrophen mit hohem Schaden geführt. Beispiele für die tibetanische Hochebene beschreibt Wang et al. (2012a), für den nördlichen Tien Shan Narama et al. (2009), für das Pamirgebirge Schneider et al. (2010) und Mergili et al. (2011), im Himalaya Richardson und Reynolds (2000b) und Mool (2005), in den Schweizer Alpen Huggel et al. (2002), in Canada Clague et al. (1985), Clague und Evans (2000) und McKillop und Clague (2006), oder in Südamerika Vilimek et al. (2005) und Carey et al. (2012). Auf der Homepage des Projektes IPL Nr. 179 (<http://glofs-database.org/>) wird versucht eine Datenbasis vergangener GLOFs weltweit zu erstellen (z.B: Vilimek et al. 2014). Entsprechend wird immer mehr versucht das von einem Gletschersee ausgehende Gefährdungspotential abzuschätzen und über eine Risikoanalyse schützende Massnahmen in aktiver (<sup>1</sup>Gletscherseen Plaine Morte, Werder et al. 2010 und Rana 2000) oder passiver Form (z.B. <sup>2</sup>Grindelwaldgletscher (Werder et al. 2010), Tsho Rolpa in Reynolds 1998/1999 und Rana 2000) zu ergreifen.

So stehen auch in der vorliegenden Arbeit zwei Gletscherseen, im nördlichen Tien Shan (Kasachstan) gelegen, im Fokus. Im nördlichen Tien Shan sind viele Gletscherseen am entstehen und bestehende am wachsen (Kasatkin und Kapitsa 2009), welche zum Teil ein hohes Gefährdungspotential aufweisen (Bolch et al. 2011, Narama et al. 2009) oder bereits ausgebrochen sind und hohen Schaden angerichtet haben (z.B. Yegorov 2007, Lentschke 2012). Einen durch eine rezente Moräne gestauten proglazialen See im oberen Teil des Kumbeltales, welches sich oberhalb der Millionenstadt Almaty befindet, ist momentan am entstehen. Dieser wird bezüglich des Gefährdungspotentials von der kasachischen Murenüberwachungsorganisation als sehr relevant und in der Arbeit von Bolch et al. (2011) als mittelgefährlich eingestuft und ist Zielobjekt in dieser Arbeit. Auf fast gleicher Höhe und nur wenige hundert Meter entfernt liegt noch ein zweiter See, der aufgrund seines aktuellen Volumens und seiner

---

<sup>1</sup><http://www.bernerzeitung.ch/region/thun/Grosser-Gletschersee-entleerte-sich/story/20953668> und <http://www.geopraevent.ch/messmethoden/gletscherseen-plaine-morte/>

<sup>2</sup>[www.gletschersee.ch](http://www.gletschersee.ch)

Entwicklung als weniger relevant beurteilt wird und in dieser Arbeit sekundär mit Blick auf eine potentielle zukünftige Entwicklung miteinbezogen wird. Nach Yegorov (2007) ist das Einzugsgebiet des Kumbel generell auch wegen hoher Verfügbarkeit von mobilisierbarem Lockermaterial stark Murengefährdet. Ausserdem haben vergangene Ereignisse, insbesondere der Gletscherseeausbruch im August 1977 im Kumbeltal (Yegorov 2007, Lentschke 2012) gezeigt, dass die betroffenen Gebiete bis nach Almaty reichen können und solche Ereignisse viel Schaden verursachen können. Eine Risikoanalyse der Moränenseen ist somit umso wichtiger, um mögliche, notwendige Massnahmen abzuschätzen um Menschen und Infrastruktur zu schützen.

In dieser Arbeit soll zum einen die Gefährdung für einen potentiellen Seeausbruch qualitativ beurteilt werden. Zum anderen soll darauf aufbauend die mögliche maximale Reichweite eines Ausbruches und das Triggering durch Eis- oder Felsabbrüche über einen modellbasierten Ansatz mit dem Modell MSF und RAMMS abgeschätzt werden. Eine Risikoanalyse für Infrastruktur und Menschen soll nur in ganz groben Zügen angesprochen werden. Im dem Sinne, dass aufgrund der Modellierungsergebnisse und der eigenen Besichtigung des Gebietes beurteilt wird, wo kritische Gebiete liegen, welche in einer eventuell späteren Arbeit fokussiert beurteilt werden können. Eine Handlungsempfehlung für weitere Messungen und Anstösse zu möglichen Massnahmen wird am Schluss angesprochen. Für das Erreichen dieser Fragestellungen sind die vier Leitfragen: „Wie wahrscheinlich ist ein Ausbruch?“, „Wie gross kann das Ausbruchsvolumen sein?“, „Wie weit kann ein Ausbruch reichen?“ und „Welche Infrastruktur ist gefährdet?“ zentral. Die Risikoanalyse nimmt dabei Bezug auf die momentane Situation als auch auf die nahe Zukunft. Neben der Risikoanalyse wird aufgrund der Modellierungsschwierigkeiten für die Fragestellung der Diskussion zur Anwendbarkeit der Modelle für den Prozess eines Seeausbruches im Untersuchungsgebiet mehr Platz eingeräumt.

---

<sup>1</sup><http://www.bernerzeitung.ch/region/thun/Grosser-Gletschersee-entleerte-sich/story/20953668> und <http://www.geopraevent.ch/messmethoden/gletscherseen-plaine-morte/>

<sup>2</sup>[www.gletschersee.ch](http://www.gletschersee.ch)

# 1. Untersuchungsgebiet

Im Folgenden wird das Studiengebiet bezüglich Lage, Klima, Gletscher, Permafrost und Naturgefahren sowie Talcharakteristik und Charakteristik der untersuchten Gletscherseen beschrieben.

## 1.1 Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt im Gebirgszug Ile Alatau im nördlichen Tien Shan. Der nördliche Tien Shan liegt grenzübergreifend zwischen Südostkasachstan und Nordostkirgisistan (Abb. 1). Der Ile Alatau bildet dabei die nördliche Abdachung auf kasachischer Seite. Von Norden wird der Gebirgszug von der kasachischen Steppe begrenzt, in südlicher Richtung schliesst sich der Gebirgszug des Kungej Alatau an. Die Region um das Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch ein markantes Höhengefälle von bis zu 4300 Meter über wenige Kilometer aus, mit den höchsten Gipfeln mit einer Höhe bis zu 5000 Meter über Meer und der kasachischen Steppe auf 700 Meter über Meer. (Yegorov 2007, Lentschke 2012)

Das Untersuchungsgebiet schliesst direkt an die Millionenstadt Almaty am Gebirgsrand des nördlichen Tien Shan an. Der untere Teil bildet das grosse Almatinkatal, welches von Almaty südlich ins Gebirge führt und später in weiterführende Täler verzweigt, eines davon das Kumbeltal. Dieses zieht sich weiter bis auf eine Höhe von 3500 m.ü.m. bei den Gletscherseen und auf 4300 m.ü.m. mit dem Berggipfel Peak Sovietov. Das Höhengefälle zwischen den Gletscherseen und der Stadt Almaty beträgt 2200 Meter über 15 km. In Abbildung 2 ist das Untersuchungsgebiet etwas vergrössert dargestellt.

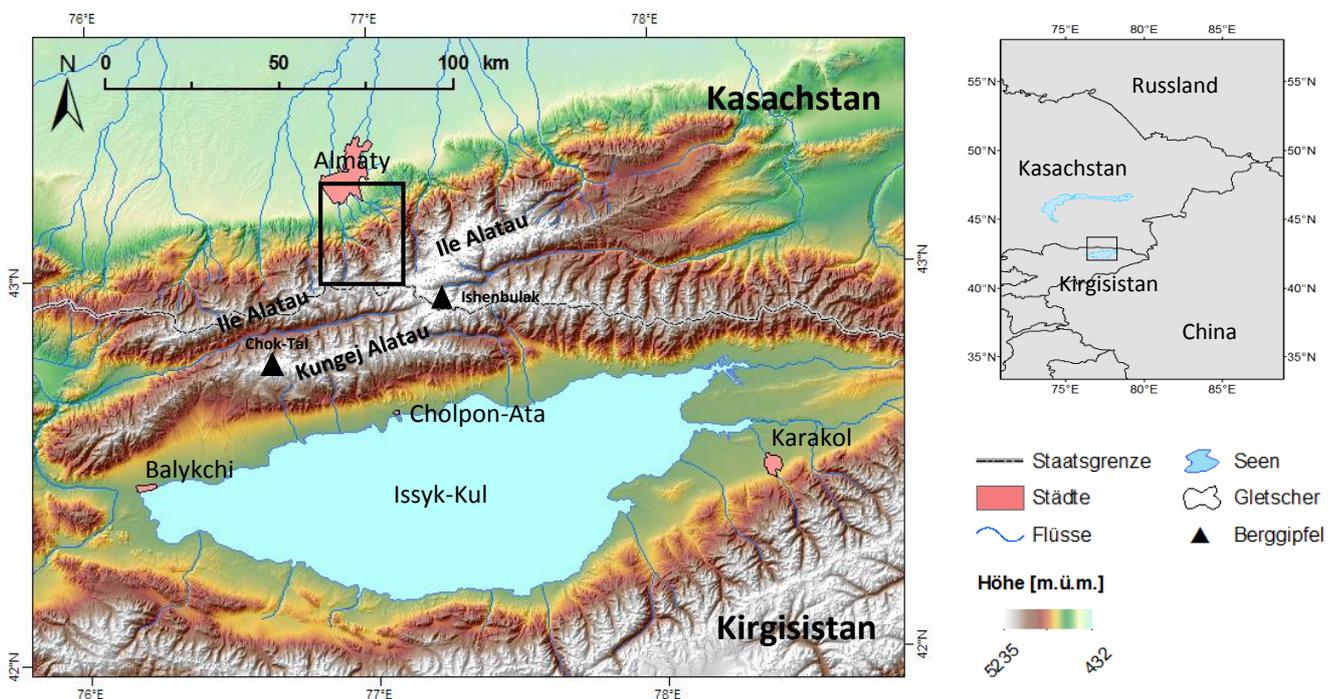


Abbildung 1: Übersichtskarte zur Lage des Untersuchungsgebietes. (Quelle: nördlicher-Tien-Shan-GIS T.Bolch 2006, GIS-Daten GIUZ 2010)

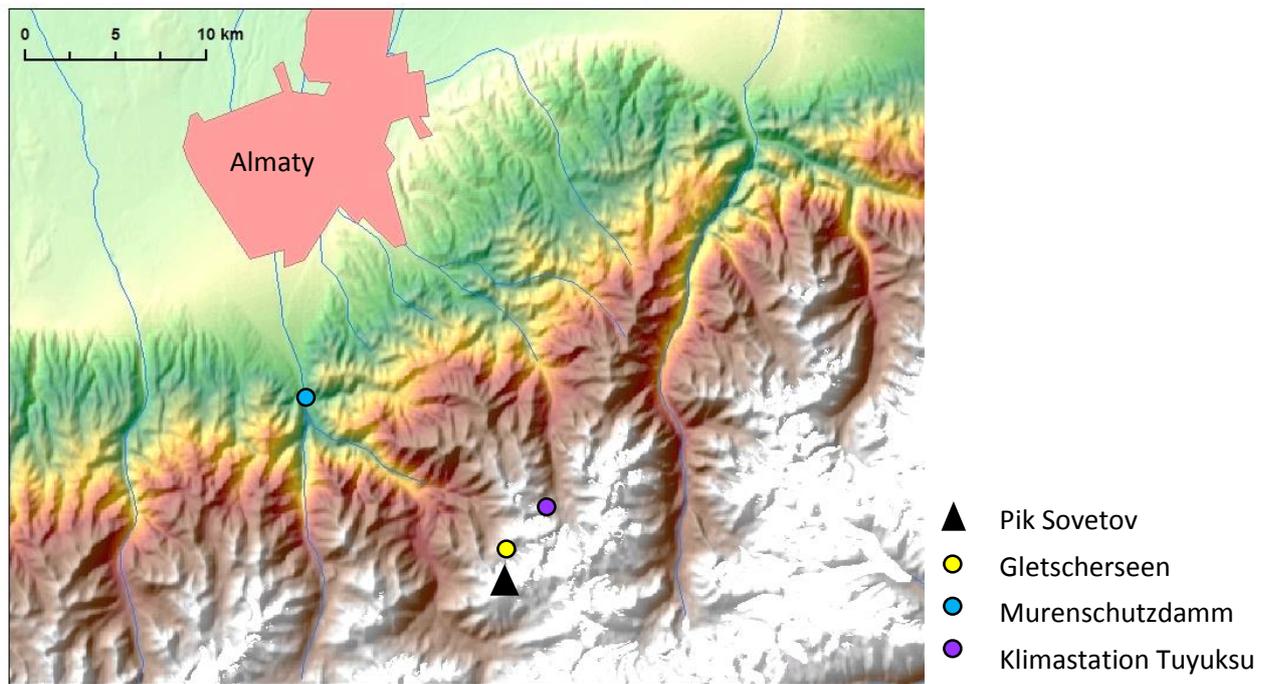


Abbildung 2: Kartenausschnitt zum Untersuchungsgebiet. (Quelle: nördlicher-Tien-Shan-GIS T.Bolch)

## 1.2 Das Klima und der Klimawandel

Durch die Lage und Topographie des Tien Shan sind die klimatischen Verhältnisse generell kontinental (Bolch 2007, Yegorov 2007, Lentschke 2012). Dabei ist ein Gradient von Nordwesten zu Südosten mit ansteigender Kontinentalität zu beobachten (Sorg et al. 2012). Es existiert dabei ein horizontaler als auch vertikaler Niederschlagsgradient existiert. Mit zunehmender Höhe tritt zum einen das Niederschlagsmaximum zeitlich später auf und zum anderen steigt die mittlere jährliche Niederschlagssumme bis zu einer Höhe von 1500-2300 m.ü.m., ab da sie dann aufgrund zu tiefer Temperaturen und dadurch geringerer Luftfeuchtigkeit wieder absinkt. Für die mittlere jährliche Lufttemperatur ist ebenfalls ein horizontaler und vertikaler Gradient in gleicher Richtung wie für den Niederschlag vorhanden. (Bolch 2007, Yegorov 2007, Sorg et al. 2012)

Der nördlichen Tien Shan, in dem das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit liegt, gibt es generell zwei Niederschlagsmaxima mit Hauptmaxima im Frühling (April-Juni) und Nebenmaxima im Herbst (September-November) und ein Minimum sowohl im Sommer (Juli, August) als auch im Winter (Dezember-Februar) (Yegorov 2007). Dies ist auch in den Niederschlagssummendiagrammen (Anhang 14) mit den Daten von der Klimastation Tuyuksu (3450 m.ü.m.) ersichtlich. Für den horizontalen und vertikalen Niederschlagsgradient im nördlichen Tien Shan gibt Yegorov (2007) für die Zeitreihe von 1964-2000 Werte von 626 mm (Almaty) bis Werte von 800-1200 mm (Tuyuksu) an. Die eigene Auswertung der Niederschlagsdaten der Klimastation Tuyuksu von 1972 bis 2013 ergibt ähnliche Werte mit dem Minimum von 684 mm und dem Maximum von 1313 mm und einem Durchschnitt von 950-1000 mm je nach Wahl der Zeitreihenlänge. Narama et al. (2009a) erhielten für 1981-1990 mit 993mm vergleichbare Werte. Die mittlere jährliche Lufttemperatur weist für die Zeitreihe 1964-2000 für den horizontalen und vertikalen Gradient im nördlichen Tien Shan einen Wertebereich von 9,6 °C

(Almaty) bis  $-6,1\text{ °C}$  (Tuyuksu) auf (Yegorov 2007). Bolch (2007) und Narama et al. (2009a) geben für die Tuyuksustation einen Wert von  $-4\text{ °C}$  an. Die eigene Auswertung der Temperaturdaten der Tuyuksustation von 1972-2013 ergibt eine durchschnittliche Die mittlere jährliche Lufttemperatur von  $-3,5\text{ °C}$  (unter der Annahme einer Zeitreihe ohne Trend). (Sorg et al. 2012, Bolch 2007, Yegorov 2007, Lentschke 2012)

In Abbildung 3 sind die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse für den Tien Shan sowie für das Untersuchungsgebiet extrahiert ersichtlich. Das abgebildete Untersuchungsgebiet entspricht nicht dem hydrologischen Einzugsgebiet und wurde so übersichtshalber und aus rechentechnischen Gründen extrahiert. Diese Form wird in der gesamten Arbeit verwendet.

Bezüglich dem Klimawandel sind in den letzten Jahrzehnten für den Niederschlag gegensätzliche Veränderungen im Tien Shan und dessen Subregionen beobachtet worden (Sorg et al. 2012). Diese Veränderungen unterscheiden sich sowohl räumlich wie auch zeitlich (Bolch 2007). Aufgrund der verfügbaren Datenmenge und –qualität und auch der grossen Abhängigkeit vom gewählten Zeitabschnitt in der Zeitreihe sind Aussagen über einen möglichen Trend im speziellen für den Niederschlag momentan noch sehr unsicher und nicht signifikant (Giese und Mossig 2004, Sorg et al. 2012, Bolch 2007). Lentschke (2012), welcher eine Trendanalyse im Raum des Ile Alatau durchgeführt hat, kommt auf einen generell positiven Trend. Gemäss Aizen et al. (2007) und Giese und Mossig (2004) hat der nördliche Tien Shan in den letzten 100 Jahren aber keine signifikante Veränderung in der Niederschlagsmenge erfahren. Die eigenen Auswertungen zeigten ebenfalls keinen sichtbaren Trend (Anhang 13). Gemäss dem best- und worst-case Szenario von IPCC für die Treibhausgasemission, wird der Niederschlag bis 2050 in den Wintermonaten um 4-8% zunehmen und im Sommer um 4-7% abnehmen. Für Gletscherseeausbrüche sind auch Änderungen in der Niederschlagsintensität von Interesse. Die eigene Auswertung ergab jedoch keine beobachtbare Veränderung (Anhang. 15).

Für die mittlere jährliche Lufttemperatur wurde gemäss Giese und Mossig (2004), Sorg et al. (2012), Bolch (2007) und Marchenko (2007) ein klar positiver Trend im Tien Shan im 20. Jahrhundert beobachtet. Auch Aizen et al. (2007) stellte einen signifikanten Anstieg der Lufttemperatur fest. Nach Giese und Mossig (2004) ist der Anstieg im nördlichen Tien Shan weniger stark als in den übrigen Regionen und nach Bolch (2007) sinkt der Trend mit zunehmender Höhe im nördlichen Tien Shan, bleibt aber bestehen und positiv. Giese und Mossig (2004) betonen die Schwierigkeit der Bestimmung des Trendkoeffizienten, da eine starke Abhängigkeit zur Wahl des Anfangs- und Endzeitpunktes der miteinbezogenen Zeitreihe besteht. Die quantitativen Werte der Trendkoeffizienten variieren stark aufgrund der Abhängigkeit des gewählten Zeitabschnittes, der Grösse des Untersuchungsgebietes sowie der Anzahl miteinbezogener Klimastationen und deren Datenqualität (Giese und Mossig 2004). Dies zeigt sich auch in der hier verwendeten Literatur (Giese und Mossig (2004):  $0.6\text{-}0.8\text{ °C}/100\text{ Jahre}$ ; Bolch (2007):  $0.8\text{ °C}/100\text{ Jahre}$  für den Zeitraum 1900-2000 und  $2.0\text{ °C}/100\text{ Jahre}$  für 1950-2000; IPCC (in Sorg et al. 2012):  $+0.1\text{ bis }+0.2\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ ; Marchenko et al. (2007):  $0.06\text{ °C} - 0.32\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ ) und in der eigenen Auswertungen ( $0.4\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ ). Die eigenen Resultate der Temperaturdatenanalyse von 1972-2013 der Daten von der Klimastation Tuyuksu stimmen relativ betrachtet überein mit den Ergebnissen der wissenschaftlichen Arbeiten der oben genannten Autoren, indem die mittlere jährliche Lufttemperatur über die Zeitspanne von 1972-2013 einen eindeutigen positiven Trend zeigt

(Anhang 11). Der Trend wird hier unter grossem Vorbehalt mit einem Wert von  $0.4^{\circ}\text{C}$  pro zehn Jahre für die absoluten Werte, für die durch den Mittelwert standardisierte mittlere jährliche Lufttemperatur mit einer Zunahme von 6% pro zehn Jahre beziffert. Die starken Vorbehalte daher, weil keine quantitative Trendanalyse (z.B. Mann-Kendall, saisonaler Mann-Kendall, Theil-Senn Slope oder Regressionsanalyse) und mit Berücksichtigung von Faktoren wie Autokorrelation und Inhomogenitäten in der Zeitreihe durchgeführt wurde. Ausserdem wurde nur eine Klimastation miteinbezogen. Auch die Erkenntnis, dass die Wahl des Anfangs- und Endzeitpunktes einen grossen Einfluss auf den berechneten Wert hat muss für die hier gemachte quantitative Aussage berücksichtigt werden. Giese und Mossig (2004), welche den Einfluss der Wahl des Anfangszeitpunktes evaluiert haben, zeigten, dass zum Beispiel der Anfangszeitpunkt 1972 oder 1971 auf 100 Jahre bezogen  $0.8^{\circ}\text{C}$  Unterschied macht und dass eine Auswertung ab 1972 einen deutlich höheren Trend ergibt als ab einem früheren Zeitpunkt. Der hier erhaltene Wert von  $0.4^{\circ}\text{C}$  pro zehn Jahre weicht auch stark von denen, in den wissenschaftlichen Arbeiten der hier miteinbezogenen Autoren angegebenen Werte ab, stimmt aber sehr gut mit den Ergebnissen von Giese und Mossig (2004) für dieselbe Zeitspanne überein ( $0.42^{\circ}$ - $0.48^{\circ}\text{C}$ ). Nach dem IPCC best- und worst-case Szenario (in Sorg et al. 2012) wird die Temperatur bis 2050 vermutlich um  $2.6 - 3.9^{\circ}\text{C}$  bzw.  $3.1 - 4.4^{\circ}\text{C}$  ansteigen. Zusammenfassend stellen alle Autoren einen signifikanten positiven Trend in der Temperatur fest, der mit der Höhe abnimmt, jedoch positiv bleibt. Der Trend ist nach Giese und Mossig (2004), Sorg et al. (2012) und Bolch (2007) vor allem in den Herbst- und Wintermonaten und speziell für den Monat September beobachtbar. Für die Monate Juni bis August beobachteten Sorg et al. (2012) und Bolch (2007) nur einen moderaten Anstieg. Giese und Mossig (2004) beobachteten hingegen auch im Juni und August einen stärkeren Anstieg. Aufgrund der Aufgabenstellung sind vor allem die Monate Mai bis September von Interesse. Auch in den eigens berechneten monatsweisen durchschnittlichen Temperaturen für diese Monate (Anhang 12), ist der durch die miteinbezogenen Autoren erwähnte Trend in den Monaten Juni bis September ersichtlich. Wie in den Arbeiten Sorg et al. (2012) und Bolch (2007) beschrieben, zeigt sich auch bei der eigenen Analyse einen geringeren Anstieg der Temperatur in den Monaten Juni und Juli. Jedoch zeigt sich in der eigenen Analyse im Gegensatz zu diesen Arbeiten einen genau so starken Temperaturanstieg für den August wie im September und kann somit mit der Aussage von Giese und Mossig (2004) in Übereinstimmung gebracht werden. Übereinstimmend mit allen ist, dass der Anstieg im Monat September markant stärker ist als in den Monaten Juni und Juli. Der Monat Mai zeigt ebenfalls einen eher stärkeren Anstieg. Dies könnte in Zukunft bedeuten, dass sich die Saison der negativen Massenbilanz bei den Gletschern verlängert und ein erhöhter Energieinput in Permafrostgebieten die Permafrostdegradation fördert.

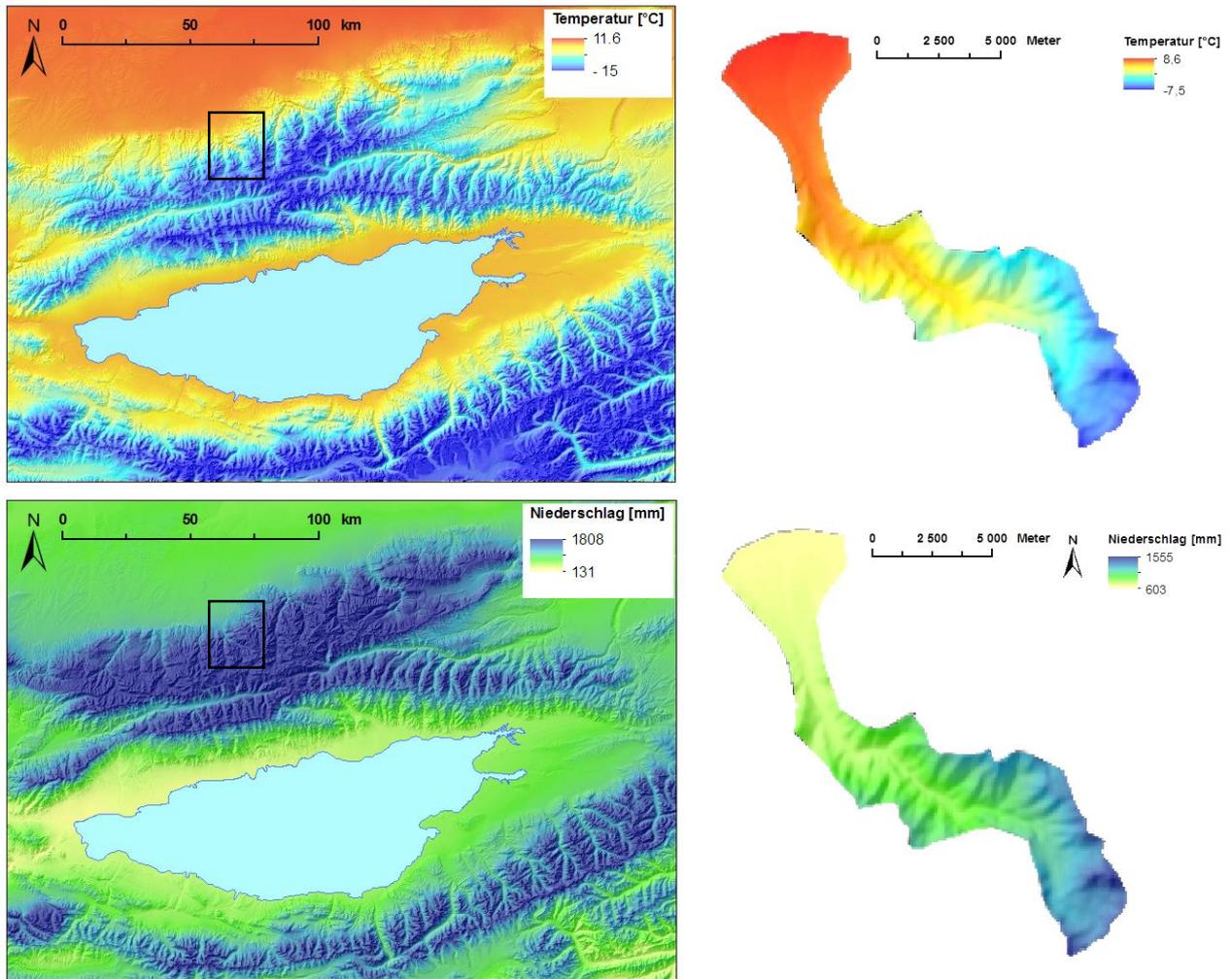


Abbildung 3: Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Tien Shan (links) und im Untersuchungsgebiet (rechts). (Quelle: nördlicher-Tien-Shan-GIS T.Bolch)

### 1.3 Die Permafrostverteilung und Permafrostentwicklung

Ein zentraler Punkt bei der Gebietscharakterisierung und für die Gefährdungsabschätzung ist die Permafrostverteilung. Die Permafrostverteilung ist Höhen- und Breitengradabhängig als auch von klimatischen und topographischen Faktoren bestimmt (Marchenko et al. 2007). Die Permafrostverteilung kann in drei Unterzonen aufgeteilt werden: Die Zone mit sporadisch vorkommendem Permafrost, die Zone mit diskontinuierlich vorkommendem Permafrost und die Zone mit kontinuierlich vorkommendem Permafrost. Dabei existiert eine Verschiebung der Untergrenze der Permafrostzonen in grössere Höhen von Norden gegen Süden und auch von nordexponierten Hängen zu südexponierten Hängen (Marchenko et al. 2007). Gorbunov et al. (1996) (in Marchenko et al. 2007) gibt einen Gradienten von 140m pro Breitengrad an und 400-800m Höhendifferenz zwischen nordorientierten und südorientierten Hängen. In Gebieten mit viel unkonsolidiertem grobblockigem Material kann die Permafrostuntergrenze in tiefere Lagen verschoben sein und das Permafrostvorkommen begünstigen. Der Permafrost kann dort auch länger erhalten bleiben, trotz Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur. (Gorbunov et al. (1996) in Marchenko et al. 2007,

Marchenko et al. 2007) Mit Fokus auf den nördlichen Tien Shan (Abb. 4) liegt die Untergrenze für kontinuierlichen Permafrost bei mindestens 3500 m.ü.m., für diskontinuierlichen Permafrost bei 3100-3200 m.ü.m. und für sporadisch auftretenden Permafrost zwischen 2700-3200 m.ü.m. (Lentschke 2012, Zhao et al. 2010, Marchenko et al. 2007 nach Gorbunov et al. 1996). Die Permafrosttemperatur im nördlichen Tien Shan betrug in den 70er Jahren auf 3300 m.ü.m. zwischen  $-0.3^{\circ}$  und  $-0.8^{\circ}\text{C}$ . Die Dicke der Auftauschicht betrug in dieser Höhe 3.5 m bis 4.0 m. Die Dicke des Permafrostkörpers lag zwischen 15 m und 90 m. (Marchenko et al. 2007)

Im Bezug auf den Klimawandel verändern sich auch die Permafrostbedingungen. Eine Konsequenz aus dem beobachteten signifikanten Anstieg der Lufttemperatur ist, dass die Grenze von flüssigem zu festem Niederschlag angestiegen ist, was eine grössere Energiezufuhr für Permafrostgebiete bedeutet, welche nun in der Zone des vermehrten flüssigen Niederschlages liegen (Aizen et al. 2007). Dies führt zu thermischen Veränderungen und Degradation des Permafrostes. Nach Marchenko et al. (2007) hat sich die Permafrostuntergrenze im 20. Jahrhundert um 150-200 Höhenmeter nach oben verschoben. Die Permafrosttemperatur ist seit den 70er Jahren bis 2004 um  $0.3-0.6^{\circ}\text{C}$  gestiegen (Marchenko et al. 2007, Zhao et al. 2010). Ende des letzten Jahrhunderts wurden vermehrt persistierende Taliks auf über 3000 m.ü.m. beobachtet. (Marchenko et al. 2007, Zhao et al. 2010) Die Dicke der Auftauschicht hat nach Marchenko et al. (2007), basierend auf verschiedenen Testgebieten und Bohrlochanalysen, im Durchschnitt um 23% zugenommen im Vergleich zu den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts. Sie erreicht nun Tiefen bis zu 5 m. Die Messungen von Lentschke (2012) bestätigen Tiefen zwischen 2-5 m. Die Bohrlöcher in der Region des Untersuchungsgebietes auf 3300 m.ü.m. zeigen eine Permafrostdicke von 20-30 Meter mit einer mittleren jährlichen Bodentemperatur von  $-0.2$  bis  $-0.7^{\circ}\text{C}$ . Der Eisgehalt variiert zwischen 5-40% mit stellenweise eisgesättigtem Permafrost und Kryostrukturen (GTN-P 2014). Mit einer Permafrosttemperatur von  $-0.1$  bis  $-0.5^{\circ}\text{C}$  nach Zhao et al. (2010) für Zentralasien liegen diese im gleichen Bereich wie die Temperaturen in den Bohrlöchern. Die Permafrosttemperatur nähert sich langsam einem empfindlichen Wert für die Existenz von Permafrost. Die Modellierung des Permafrostes im Untersuchungsgebiet zeigten, dass das Gebiet um die Gletscherseen im Grenzbereich zwischen sporadischem und diskontinuierlichem Permafrostvorkommen liegt, was gut mit der Angabe der Bohrlöcherlage (diskontinuierlich) übereinstimmt. In Bezug auf den fortschreitenden Klimawandel ist eine Zonenverschiebung nicht auszuschliessen. Die eigene Auswertung für eine Zunahme der Gradtage als Mass für die Veränderung des Energieinputs, ergab jedoch keine beobachtbare Veränderung (Anhang 16). Die Zeitreihe war hingegen mit 16 Jahren relativ kurz.

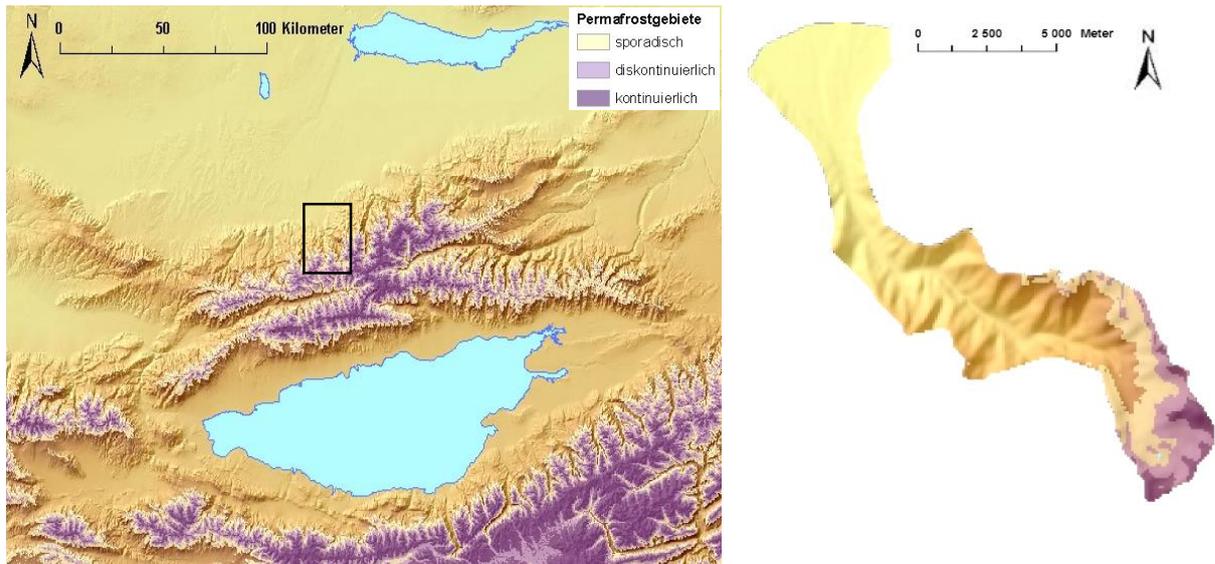


Abbildung 4: Permafrostverteilung im Tien Shan (links) und im Untersuchungsgebiet (rechts). (Daten zur Verfügung gestellt von T.Bolch)

#### 1.4 Die Gletscher und Gletscherentwicklung

Nach Bolch et al. (2011) weisen die Gletscher im nördlichen Tien Shan ein kaltes oder polythermales Temperaturregime auf. Die Lufttemperatur verzeichnet einen signifikanten Anstieg, welcher zum Rückzug der Gletscher führt (Aizen et al. 2007, Narama et al. 2009a). Eine beobachtete Konsequenz aus dem Anstieg der Lufttemperatur ist, dass die Grenze von flüssigem zu festem Niederschlag angestiegen ist, was sich negativ auf den Haushalt der Gletscher auswirkt (Aizen et al. 2007). Giese und Mossig (2004) betonen zusätzlich den wesentlichen Einfluss der Länge der Ablationsperiode auf die Massenbilanz. Die Ablationsperiode hat sich nach ihren Analysen vor allem durch den markanten Temperaturanstieg im September verlängert und beeinflusst somit die Massenbilanz negativ.

Der Gletscherrückzug begann Anfang des 20. Jahrhunderts und verstärkte sich ab den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts (Giese und Mossig 2004). Dies zeigen auch die Massenbilanzmessungen und Gletscherfrontvariationen des Tuyuksugletschers im Nachbartal des Untersuchungsgebietes (Abb. 5). Die durch die WGMS publizierten Daten von 1965-2010 über den Tuyuksugletscher im Nachbartal zeigen eine mehrheitlich negative Massenbilanz. Der Bericht der WGMS und UNEP (2008) über globale Gletscheränderungen beschreibt eine negative Flächenveränderung der Gletscher im Tien Shan von 25-35% im 20. Jahrhundert (durch Podrezov et al. 2002, Kutuzov 2005, Narama et al. 2006 und Bolch 2007). Narama et al. (2009a) berechneten eine Flächenverminderung um 12% (1970-2000) und 4% (2000-2007) für den nördlichen Tien Shan. Aufgrund des „feuchte“ Klimas im nördlichen Tien Shan, reagieren die Gletscher im nördlichen Tien Shan besonders empfindlich auf klimatische Veränderungen (Narama et al. 2009a).

Die rekonstruierte Längenvariation der Gletscher im Untersuchungsgebiet von 1972 bis 2013 zeigt die Lage der Gletscherfront des Sovetovgletschers 1972 knapp 300-500 Meter weiter talwärts als gegenwärtig. Bis 1976 fand ein markanter Rückzug der Gletscherfront beziehungsweise eine Absenkung der Gletscherfront statt, so dass der schuttfreie Bereich im Bereich des heutigen

Moränendamms zu liegen kam. Zwischen 1979 und 1990 erfolgte ein teils markanter Rückgang und eine Teilung des Gletschers. Die Gletscherfront, welche heute im See liegt, zog sich bis fast zur heutigen Lage am Moränendamm zurück. Seit 1990 zeigt sich nur eine sehr schwache negative Längenänderung. Dies kann durch die Topographie erklärt werden. Beim Gorelniksee kann ein Rückzug von 1979 bis heute von ungefähr 120m beobachtet werden. Zwischen 1990 und 1999 wurde das Seebecken freigelegt und der See begann zu entstehen.

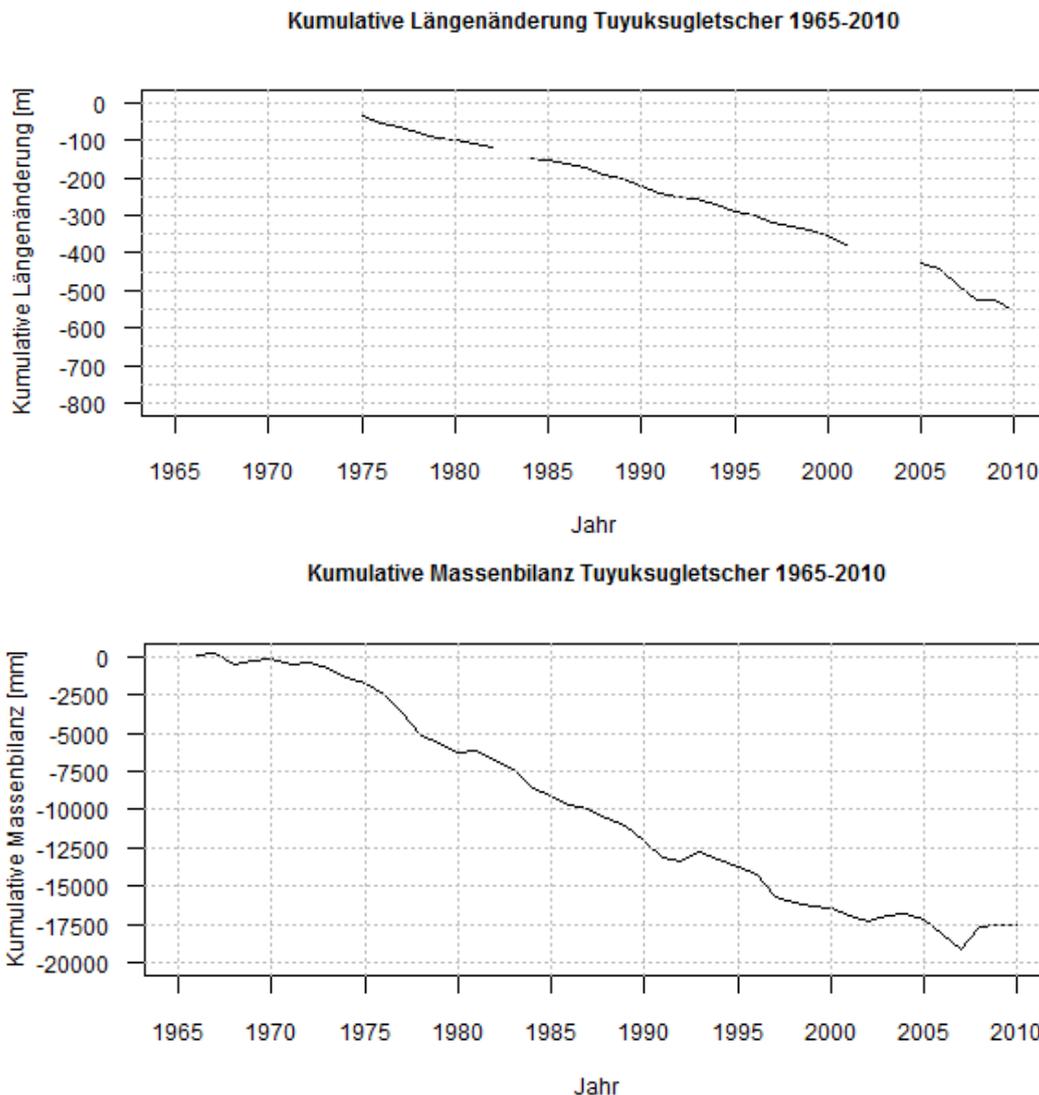


Abbildung 5: Gletscherentwicklung des Tuyuksugletschers im Nachbartal des Untersuchungsgebietes von 1965-2010. Oben: kumulative Längenänderung der Gletscherfront; Unten: kumulative Massenbilanz (netto). (Daten aus der „fluctuations of glaciers“ Reihe der WGMS: <http://www.wgms.ch/fog.html>)

### 1.5 Naturgefahren

Zu den häufigsten Naturgefahren im nördlichen Tien Shan gehören Lawinen, Murgänge, Hangrutschungen, Fels- und Bergstürze. Durch Starkniederschlag oder einen Gletscherseeausbruch verursachte Hochwasser gehen in dieser Region aufgrund der hohen Verfügbarkeit von mobilisierbarem Schuttmaterial in Murgänge über und sind somit in der Naturgefahr Murgang

inbegriffen (Blagovechshenskiy und Yegorov 2009). Gemäss dem Bericht des CAC DRMI (2009) bestehen über 500 ausbruchsgefährdete Gletscherseen in Kasachstan. Weiter ist aufgrund der tektonischen Situation die Region stark erdbebengefährdet. Starke Erdbeben werden alle 80-100 Jahre erwartet, mit dem letzten 1911. Es besteht daher die Möglichkeit, dass in den nächsten 10 Jahren ein starkes Erdbeben auftritt (IRIN 2004 in CAC DRMI Bericht 2009). (Blagovechshenskiy und Yegorov 2009 und CAC DRMI Bericht 2009)

Neben der entstehenden Gefahr durch das Erdbeben selber, kann ein Erdbeben auch als Trigger oder zur erhöhten Disposition für die zuvor genannten Naturgefahren wirken. Beispiele dazu für die Region des nördlichen Tien Shan und Ile Alatau finden sich in Delvaux et al. (2001) oder Yegorov (2007). Im Kontext dieser Arbeit interessieren vor allem die beiden Naturgefahren Murgänge und Felsstürze sowie das Erdbeben als Trigger. Murgänge werden mit Schwerpunkt in den Regionen mit Gletschern und Gletscherseen im Einzugsgebiet beobachtet. Wesentlich für das Entstehen von Murgängen ist die Verfügbarkeit von mobilisierbarem Schuttmaterial. Die klimatischen Bedingungen im nördlichen Tien Shan führen zu intensiver Verwitterung des Gesteins und die Gletscher weisen teilweise einen hohen Sedimenttransport auf. Dies führt zu einer hohen Verfügbarkeit von Schuttmaterial vor allem im oberen Teil eines Einzugsgebietes. Seitlicher Hangabtrag kann weiteres Schuttmaterial in die Laufbahn eines Murganges eintragen, das bei genügend hoher Wassersättigung mobilisiert werden kann. Die Trigger für Murgänge können nach Blagovechshenskiy und Yegorov (2009) Starkniederschlag (87% Anteil), glazialen Ursprungs (10-11% Anteil) oder Schneeschmelze (1-2% Anteil) sein. Bei den Murgängen glazialen Ursprungs ist für diese Arbeit eine genauere Betrachtung der proglazialen Gletscherseeausbrüche als Ursache wichtig. Dort stellt sich die zentrale Frage, was die Hauptauslösefaktoren für einen Gletscherseeausbruch sind. Bei in der hier verwendeten Literatur beschriebenen Ereignissen und Untersuchungen zur Gletscherseedynamik, wird ein Ausbruch hauptsächlich durch Starkniederschlag und rückschreitende Erosion der Moräne im Oberflächenabfluss ausgelöst. Nach Kasatkin und Kapitsa (2009), Jansky et al. (2006) und aufgrund mündlicher Informationen kann auch ein unterirdischer Abfluss zur Entleerung des Sees führen. Pipingprozesse können daher durchaus eine Rolle spielen. Die Hauptsaison für Murgänge ist zwischen April und August mit den meisten Beobachtungen im Mai und Juli. Für das grosse Almatinka Tal, das den unteren Teil des Untersuchungsgebietes bildet, zeigt die Analyse von Blagovechshenskiy und Yegorov (2009) ein klares Maximum im Juli. Eine Zusammenfassung bezüglich Trigger und Charakteristik von bedeutenden Murgängen in der Region des Ile Alatau der letzten hundert Jahre, geben Blagovechshenskiy und Yegorov (2009) und Lentschke (2012). Diese zeigt, dass Gletscherseeausbrüche immer wieder zu grossen Murgängen geführt haben (Tab. 2) und ein aktuelles Thema im Bereich Naturgefahren sind. Ein Murgang durch einen Gletscherseeausbruch, welcher durch ein Erdbeben ausgelöst wird, wurde in der verwendeten Literatur nicht beschrieben. Dennoch kann ein Erdbeben in Multiprozess-orientierter Betrachtungsweise eine Rolle spielen. Fels- und Bergstürze ereignen sich nach Blagovechshenskiy und Yegorov, (2009) vorwiegend in den mittleren bis oberen Lagen des Gebirges und werden oft durch seismische Aktivitäten ausgelöst. Ein Fels- oder Eissturz oberhalb eines Gletschersees und in dessen Falllinie könnte zu einem Ausbruch des Sees führen.

Tabelle 2: Murgangvolumen und Abfluss durch Niederschläge und Gletscherseeausbrüche im Ile Alatau. (Nach Blagovechshenskiy und Yegorov 2009)

| Einzugsgebiet        | Datum      | Ursache     | Typ          | Abfluss [m <sup>3</sup> /s] | Volumen (in tausend m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|------------|-------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Shamalgan            | 19.08.1975 | Künstlich   | Murgang      | 430                         | 80                                   |
| Kaskelen             | 08.07.1921 | Regen       | Murgang      | 615                         | -                                    |
| Kaskelen             | 23.07.1980 | Seeausbruch | Murgang      | 580                         | 820                                  |
| Grosses Almatinkatal | 1841       | -           | -            | -                           | -                                    |
| Grosses Almatinkatal | 08.07.1950 | Regen       | Murgang      | 1000                        | 1500                                 |
| Grosses Almatinkatal | 19.08.1975 | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Grosses Almatinkatal | 03.08.1977 | Seeausbruch | Murgang      | 10000                       | 3000                                 |
| Grosses Almatinkatal | 03.07.1994 | Seeausbruch | Murgang      | 100                         | 180                                  |
| Kishi Almaty         | 08.07.1921 | Regen       | Murgang      | 920                         | 3250                                 |
| Kishi Almaty         | 10.05.1944 | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Kishi Almaty         | 22.05.1951 | Seeausbruch | Murgang      | -                           | 1500                                 |
| Kishi Almaty         | 07.08.1956 | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Kishi Almaty         | 05.07.1973 | Seeausbruch | Murgang      | 7000                        | 3800                                 |
| Kishi Almaty         | 14.07.1999 | Regen       | Murgang      | 200                         | 20                                   |
| Talgar               | 05.05.1947 | Regen       | Murgang      | -                           | -                                    |
| Talgar               | 07.1973    | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Talgar               | 08.1974    | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Talgar               | 06.07.1993 | Seeausbruch | Murgang      | 1340                        | 2380                                 |
| Esik                 | 06.07.1958 | Seeausbruch | Murgang      | -                           | -                                    |
| Esik                 | 07.07.1963 | Seeausbruch | Murgang      | 7000                        | 5800                                 |
| Turgen               | 07.04.1967 | Regen       | Schlammstrom | 73                          | 2.4                                  |

## 1.6 Die Entwicklung von Gletscherseen

Nach Narama et al. (2009b) sind die meisten Gletscherseen im nördlichen Tien Shan entweder Moränen gestaute Seen oder Seen, welche sich durch Thermokarstprozesse oder Schmelzwasseransammlung auf eishaltigem Schuttmaterial an der Gletscherfront bilden. Eine Zusammenfassung und Charakterbeschreibung zu den Gletscherseetypen fokussiert auf Kirgisistan gibt Jansky et al. (2006) und Jansky et al. (2010). Die Seen sind nach Narama et al. (2009b) zwar flächenmässig eher klein im Vergleich zu Gletscherseen im Himalaya, können aber auch sehr destruktiv sein, wie vergangene Ereignisse (z.B. 1973, 1977) zeigten. Eine Besonderheit der Moränen gestauten Gletscherseen im Tien Shan ist, dass die Moränen vergleichsweise kleindimensioniert sind und um 1900 durch den Rückzug der Gletscher entstanden sind. Das bedeutet, dass diese Moränen oft noch Toteis im Innern aufweisen und daher bei einer allfälligen Eisdegradation sehr instabil werden können. (Narama et al. 2009b)

Narama et al. (2009b) erwähnen auch, dass aktuell die Anzahl der Gletscherseen und deren Grössen ungefähr dem Zeitraum der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts entspricht, wo viele GLOFS (glacier lake outburst floods) passiert sind. Dies durch den verstärkten Rückzug der Gletscher (Narama et al. 2009a). Verheerende GLOF's können daher aktuell und in naher Zukunft durchaus passieren. Narama et al. (2009b) besagen, dass die zwei Haupttrigger eines Ausbruchs der Moränenbruch durch Toteisdegradation und die rückschreitende Erosion durch erhöhten Abfluss infolge intensiver Niederschläge oder Schmelzwasserproduktion sind.

Im Wachstumsverhalten beschreibt Wang et al. (2013) einen allgemein beobachtbaren Trend der Gletscherseen in Tien Shan. Dabei weisen die Seen im nördlichen Tien Shan zwar immer ein positives Wachstum auf, der Trend pro Jahr ist aber negativ und liegt nach Wang et al. (2013) aktuell bei 0.7-0.1% pro Jahr. Beobachtet wurde auch, dass Seen, welche direkten Kontakt zum Gletscher haben, sich in den letzten Jahren stärker verändert haben, als Seen, welche isoliert im Moränenmaterial liegen. Zu Grunde liegt die Nähe der hydrologischen Verbindung zum Gletscher, von dem der See gespeist wird. Die hydrologische Bilanz eines Gletschersees und dadurch sein Wachstum oder seine Verkleinerung wird über den Niederschlag, die Temperatur (Schmelzwasserzufuhr, Evaporation) und den Abfluss bestimmt. Um das Verhalten des Sees genau zu verstehen, muss der Zusammenhang zwischen Gletscher Schmelzwasserzufuhr und Seebasin-Hydrologie verstanden werden. Der Gletschersee-Wasserspiegel ist vor allem abhängig vom Verhältnis von Zufuhr und Abfuhr von Schmelzwasser und somit vom Verhalten des Gletschers (Wang et al. 2013). Darin enthalten ist so auch der Einfluss des Klimas und des Klimawandels und die Reaktion des Gletschers. Nach Giese und Mossig (2004), Bolch (2007), Marchenko (2007), Sorg et al. (2012) und Wang et al. (2013) war im Tien Shan nur bei der Temperatur eine Änderung in den letzten Jahrzehnten signifikant zu beobachten. Daher wird das Wachstumsverhalten von proglazialen Seen vermutlich zu einem grossen Teil durch die Zufuhr von Schmelzwasser bestimmt. Kasatkin und Kapitsa (2009) untersuchten die Dynamik der durch Moränen gestauten Gletscherseen im Ile Alatau. Diese Studie lässt sich gut in die Aussagen von Wang et al. (2013) einbetten.

#### Beschrieb der untersuchten Gletscherseen

Die Seen Sovetov und Gorelnik (Anhang 6 und 8) welche hier untersucht werden, lassen sich generell gut in diese Beschreibung der Gletscherseecharakteristik und –Entwicklung im nördlichen Tien Shan einbetten. Über die Seen und zu früheren Ereignissen sind wenige Daten vorhanden (Tab. 3). Die aktuellsten Vermessungsdaten für den See Sovetov stammen vom 23. August 2013 und 8. August 2014 (Anhang 10) und wurden durch das Geographische Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan durchgeführt. Frühere hydrographischen Vermessungsdaten sind in Lentschke (2012) zu finden. In der genannten Arbeit wird auch ein vergangener Seeausbruch im Jahr 1977 beschrieben. Dieser See (Anhang 7) lag jedoch ungefähr 100 m tiefer als der jetzige See und betrug ein Volumen von ca. 220'000 m<sup>3</sup>. Der aktuelle See ist in den vergangenen Jahren durch Zusammenwachsen aus drei kleineren Seen entstanden. Nach Lentschke (2012) beträgt das Seevolumen 180'000 m<sup>3</sup>, die Seefläche 30'000m<sup>2</sup> und die Tiefe des Sees maximal 14 m (Messung 2011). Die bathymetrische Messung vom Jahr 2013 (Anhang 10) ergab ein Volumen von 217'000 m<sup>3</sup> und eine Fläche von 32'000 m<sup>2</sup>. Die maximale Tiefe wurde bei 14,5 m gemessen. Die Länge des Sees ergab 350 m und die Breite 240 m. Die aktuellsten Messungen ergaben ein Volumen von 246'500 m<sup>3</sup>, eine Seefläche von 36'000m<sup>2</sup> und eine maximale Seetiefe von 15.3 m. Die aktuelle Breite beläuft sich auf 370 m und auf eine Länge (Distanz Moränendamm-Gletscherzunge) von minimal ca. 43 m, maximal 160 m.

Tabelle 3: Bathymetrische Daten zum See Sovetov. (Quelle: Lentschke 2012, geographisches Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaften der Republik Kasachstan)

|                           | See 1977 | 2011    | 2013    | 2014    |
|---------------------------|----------|---------|---------|---------|
| Volumen [m <sup>3</sup> ] | 220'000  | 180'000 | 217'000 | 246'500 |
| Fläche [m <sup>2</sup> ]  | -        | 30'000  | 32'000  | 36'000  |
| Tiefe [m]                 | -        | 14      | 14.5    | 15.3    |

Das Volumen hat vom Jahr 2012 zum Jahr 2013 um 20.5 %, vom Jahr 2013 zum Jahr 2014 um 13.6% zugenommen. Das Wachstum war bei der Fläche zwischen 2012 und 2013 6.7%, zwischen 2013 und 2014 mit 12.5% doppelt so hoch, bei der Tiefe 3.5% beziehungsweise 5.5%. Dies sind sehr viel höhere Wachstumsraten als von Wang et al. (2013) für den Tien Shan angegeben. Der See ist somit momentan trotz Massnahmen zur Seespiegelsenkung (Anhang 7) am Wachsen und besitzt bereits ein grösseres Volumen als der ehemalige See etwas weiter unten, welcher mit seinem Ausbruch zu beträchtlichen Schäden geführt hat. Dieser Seeausbruch führte zu einem Murgangereignis, dass die Stadt Almaty erreichte und dank einem Murenschutzdamm direkt vor der Stadt dort aufgefangen wurde. Dies ist auch der Anlass, weshalb der aktuelle See beobachtet wird und eine Gefährdungsabschätzung erwünscht ist.

Der See ist noch in direktem Kontakt mit dem Gletscher und ist somit mit dem hydrologischen System des Gletschers direkt verbunden. Der hydrologische Input in den See bildet sich aus Schmelzwasser vom Gletscher und Schnee sowie aus Niederschlag. Der hydrologische Output besteht aus einem Oberflächenabfluss und aus Verdunstung. Pipingprozesse durch den Moränendamm konnten bei der eigenen Feldarbeit nicht beobachtet werden und werden in der Literatur nicht beschrieben. Die Gletscherzunge ist seitlich des Sees schuttbedeckt und zeigt starke Eisdegradation auf. Der Bereich, welcher direkt in den See mündet, ist schutfrei und weist über den gesamten Bereich Eisabbrüche auf. Der Vergleich der bathymetrischen Messungen der Jahre 2013 und 2014 lässt auf vier Regionen schliessen, in denen sich der See verändert (Anhang 10). Zum einen existieren zwei Bereiche am Zungenrand des Gletschers, in denen der See tiefer wird. Vermutlich wird nun durch den Gletscherrückzug die maximale Tiefe des Beckens erreicht. Die anderen beiden Bereiche liegen je am seitlichen Rand des Sees. Dort liegt viel schuttbedecktes Eis, dass nun abschmilzt und mehr Seefläche frei gibt. Von Interesse ist vor allem der nord-westliche Rand des Sees. Unterhalb des nord-westlichen Randes existiert ein Bach, dessen Ursprung entweder im Gletscher oder im See liegt. Falls der Bach im See seinen Ursprung oder eine Verbindung zum See hat, wäre ein potentieller Ausbruch auch seitlich möglich. Während der Feldarbeit wurden auch täglich Eisabbrüche an der flacheren Gletscherzunge beobachtet. All dies zeigt die Dynamik und das Potential zur Vergrösserung des Sees. Die abgebrochenen Eisblöcke mit einem maximalen Durchmesser von 5 m - 10 m, welche möglicherweise den Ausfluss blockieren könnten, sind ein Indikator für die Gletscherdynamik.

Die Gletscherzunge selber ist relativ flach und befindet sich zurzeit kurz vor einem Bereich mit grösserer Neigung. Es ist daher anzunehmen, dass der Rückzug in naher Zukunft in eine beschleunigte Phase kommt, der See sich vergrössert und die Ausbruchsfahr des Moränensees steigt. Dies zum einen durch das höhere Volumen und zum anderen könnten Kalbungsprozesse die Dammerosion fördern. Die Lage des Gletschers erklärt möglicherweise auch die viel höheren Wachstumsraten des

Sees als von Wang et al. (2013) angegeben. Das Potential zur weiteren Flächen- und Volumenvergrößerung zeigt auch die Berechnung des möglichen zukünftigen Gletschersees (Abb. 6) mit dem GlabTop Modell (Paul und Linsbauer 2012, Linsbauer et al. 2012).

Das Freeboard (Abstand vom Seespiegel zur Moränenkrete) ist nach Lentschke (2012) ungefähr 10 m hoch. Eigene Messungen ergaben eine maximale Höhe von 16 m und eine minimale Höhe von ungefähr 0.4 m bei der Abflussrinne. Im Sommer 2014 wurden zwei Abflussröhren zur Seespiegelabsenkung in den Oberflächenabfluss gelegt. Dies bewirkte eine Seespiegelabsenkung von schätzungsweise 50 cm (Bildvergleich). Die Moräne weist einen Oberflächenabflusskanal auf, der zu zwei kleineren Seen entwässert (Anhang 7) die unterhalb des Moränendamms liegen. Diese Seen sind die Überreste des ehemaligen Moränensees, der 1977 durch einen Ausbruch vollständig entleert ist. Die beiden Reliktseen, die auf etwa 3460 m.ü.m. parallel zueinander liegen, zeigen aufgrund eigener Beobachtungen ein kleines Wasservolumen. Zwischen den Seen erstreckt sich eine kleine Erhöhung. Der ehemalige Moränendamm ist immer noch vorhanden und durch einen grossen Oberflächenabfluss vor dem orographisch linken See zerschnitten. Wobei interessanterweise das Wasser im Abflusskanal der Moräne unterirdisch abfließt und am Ende der Moräne wieder oberflächlich weiter abfließt. Das Wasser des aktuellen Moränensees entwässert in den orographisch rechten See. Diese Situation führt zur Frage, was für eine Rolle dieser Bereich des ehemaligen Gletschersees bei einem Ausbruch des heutigen Gletschersees spielt? Übernimmt dieser Bereich die Funktion eines Retentionsbeckens (temporär) und einem „dosierterem“ Abfluss oder wirkt er als Wasser- und Schutzzufuhr und vergrößert das Ausbruchsvolumen zusätzlich?

In Bezug auf die Aussage von Narama et al. (2009), dass viele Moränen nach der kleinen Eiszeit entstanden sind und oft Eis enthalten, kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Moränendamm Eis enthält und daher kann vermutet werden, dass mögliches Eis im Moränendamm degradiert und der Moränendamm dadurch instabiler wird. Lentschke (2012) führte im Sommer 2010 und 2011 geoelektrische Messungen zur Bestimmung des Permafrostes und Eisgehaltes unter anderem an der Moräne des Sees Sovetov und Gorelniksees durch. Permafrostvorkommen und ein geringer bis hoher Eisgehalt beim Gorelniksee und ein sehr geringer bis geringer Eisgehalt beim See Sovetov in der Moräne waren seine Resultate. Von einer stabilisierenden Wirkung auf den Moränendamm ist auszugehen (Lentschke, 2012). Interessant sind seine Ergebnisse beim Oberflächenabfluss beim See Sovetov. Dort erfasste er unter dem Oberflächenabfluss einen Talik, dem er den Schwachpunkt am Moränendamm zuschreibt. Der Oberflächenabfluss und die Erkenntnis, dass dort eine Schwachstelle liegt, deuten darauf hin, dass ein Ausbruch durchaus auch hier wie 1977 durch rückschreitende Erosion aufgrund eines erhöhten Abflusses entstehen könnte. Für die Dicke der Auftauschicht am Moränendamm des See Sovetov mass Lentschke (2012) 4 m. Der Bereich unterhalb des Moränendamms besteht aus viel Schuttmaterial, welches möglicherweise noch Eis enthält. Aufgrund von beobachteten Wasseraustritten aus benachbarten Schutthängen und Schuttabrutschungen (Anhang 9), wird vermutet, dass dieses Eis im Bereich der Auftauschicht liegt und in den wärmeren Monaten schmilzt und der Schutt als mobilisierbares Lockermaterial zur Verfügung steht. Die gemessenen Auftauschichtdicken durch Lentschke (2012) stützten diese Vermutung. Seine Messungen ergaben jedoch keine deutlichen Permafrostvorkommen auf dieser Höhe und schreibt solchen

Phänomenen eher eine späte Gefröris zu. Die beobachtete nicht geschlossene Vegetation bis zur Höhe der Reliktseen von 1977 ist ebenfalls ein Hinweis darauf, dass ein Auftauschicht vorhanden ist oder der Permafrost degradiert.

Der Gorelniksee liegt auf einer Höhe von 3553 m.ü.m. Aktuelle bathymetrische Messdaten sind für diesen See nicht vorhanden. Der See selber zeigte in den letzten Jahrzehnten eine negative Entwicklung und besitzt momentan ein ungefähres Volumen von 9000 m<sup>3</sup> (mündliche Aussage). Die Messungen von Lentschke (2012) im Jahr 2011 ergaben ein Volumen von 9000 m<sup>3</sup>, eine maximale Tiefe von 8 Metern und eine Fläche von 2500 m<sup>2</sup>. Speziell bei diesem See ist seine Lage mehrheitlich hinter einer breiten blockgletscherartigen Fließstruktur. Nur auf der östlichen Seite ist ein typischer Moränenwall ersichtlich. Das Freeboard besitzt momentan eine Höhe von knapp 40 Metern (eigene Messungen). Der See ist noch im direkten Kontakt zum Gletscher und somit wie der See Sovetov mit dem hydrologischen System des Gletschers direkt verbunden. Der hydrologische Input in den See bildet sich aus Schmelzwasser vom Gletscher und Schnee sowie aus Niederschlag. Der hydrologische Output besteht aus Verdunstung und unterirdischem Abfluss. Der Ausflusssort unterhalb des Sees ist nicht genau bekannt. Während den Feldarbeiten wurde aber an einer Stelle unterhalb des Moränen-Fließstrukturkomplexes ein Ausfluss beobachtet, der möglicherweise der Abflussausgang ist. Der Ausfluss entwässert in die Reliktseen vom Ereignis 1977. Ein Hinweis für Permafrostdegradation könnte dieser Wasserausfluss aus der Fließstruktur sein, falls dieses Wasser vom See stammt. Andernfalls könnte es auch Wasser aus der Auftauschicht sein, wobei der Abfluss eher zu hoch ist für Wasser aus der Auftauschicht. Die Dicke der Auftauschicht beim Gorelniksee wurde auf 2 m durch Lentschke (2012) bestimmt.

Die Gletscherzunge ist sehr flach und seitlich mit Schutt bedeckt und geht nach ungefähr 700 Meter in einen steilen Hängegletscher über. Der längere flache Bereich führt zum, über Zeitreihenvergleich, langsamen Rückzug des Gletschers. Solange der unterirdische Abfluss besteht, wird der See vermutlich kaum an Volumen wieder gewinnen und eine erhöhte Ausbruchgefährdung aufweisen. Ein Ausbruch

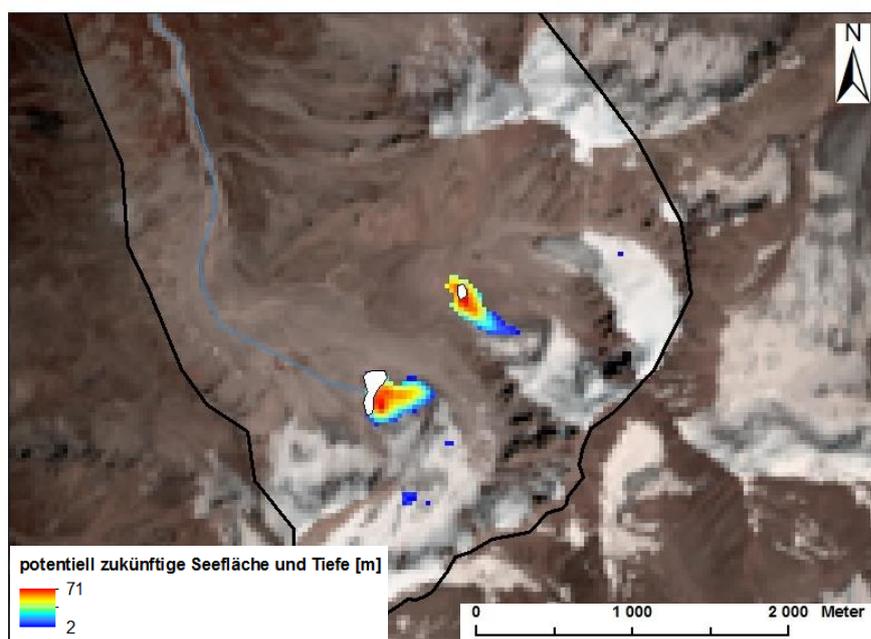


Abbildung 6: Glabtop-Resultate für die potentielle Fläche und Tiefe der Seen Sovetov und Gorelnik. (Zur Verfügung gestellt von T.Bolch, Daten berechnet nach Paul und Linsbauer 2012)

wird aufgrund der Situation am ehesten durch einen Seeimpakt durch einen Eisabbruch vom Hängegletscher passieren. Dies vor allem mit Blick in die Zukunft im Kontext der beobachteten Klimaveränderungen, Gletschercharakteristik und dem potentiellen Seewachstum.

### **1.7 Talzonierung für Murgänge**

Das Untersuchungsgebiet zeigt über seine 15 Kilometer (Luftdistanz) eine hohe Variabilität in der Morphologie. Dabei stechen drei markante Wechsel hervor, durch die das Untersuchungsgebiet in dieser Arbeit in drei Zonen für Murgangprozesse unterteilt werden kann (Abb. 8 sowie Anhang 1-4):

- Der obere Teil des Kumbeltales zwischen den Gletscherseen (3500 m.ü.m.) und der steilen Murgangrinne ab 2950 m.ü.m.. Dieser Bereich ist durch glaziale und periglaziale Prozesse gekennzeichnet. Unterhalb der Moränenseen flacht das Gelände bis zur Murgangrinne stark ab ( $<11^\circ$ ), so dass dieser Bereich eher als Akkumulationsgebiet für Murgangprozesse eingestuft werden kann. (später oberer Teil genannt)
- Die steile Murgangrinne ( $14^\circ$ - $25^\circ$ ) ab 2950 m.ü.m. bis zum unteren Ende des Kumbeltales (2160 m.ü.m.) und der weitere Gerinneverlauf bis auf eine Höhe von ungefähr 1800 m.ü.m.. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch eine enge tief einschneidende Murgangrinne in pleistozänem Moränenmaterial (Lentschke 2012) mit umgebenden steilen vegetationsbedeckten Hängen. Der untere Teil flacht etwas ab und das Tal verbreitert sich. Die steile Murgangrinne gilt als Transit- und Erosionsstrecke für Murgänge. Der untere Teil zeigt Zonen sowohl für Erosion als auch Akkumulation bei Murgangprozessen. (später mittlerer Teil genannt)
- Der unterste Teil zwischen 1800 m.ü.m. bis zum Murenschutzdamm auf 1260 m.ü.m.. Dieser Bereich ist durch eine stärkere Talverbreiterung gekennzeichnet. Im Bereich vor dem Murenschutzdamm besteht lichte Busch- und Baumvegetation am Talboden. Die Neigung reduziert sich hier abermals stark ( $<8^\circ$ ) und charakterisiert das Akkumulationsgebiet für Murgangprozesse.

### **1.8 Siedlung und Infrastruktur**

Das Untersuchungsgebiet liegt im Naherholungsgebiet der Stadtbevölkerung von Almaty und wird touristisch genutzt. Im unteren Teil des grossen Almatinka Tales befinden sich einige Cafés, Restaurants und Hotels (Yegorov 2007). Eigene Beobachtungen zeigten, dass das Bachgerinne vor allem im unteren Teil gerne als Picknickstellen genutzt wird. Aufgrund vergangener Murgänge wird das Tal gegen die Stadt Almaty durch einen Murenschutzdamm abgeschlossen. Im oberen Teil des grossen Almatinka Tals liegt der grosse Almatinka See, der als Wasserquelle für die Stadt Almaty dient. Etwas unterhalb des Endes des Kumbeltales liegt dafür ein Wasserkraftwerk, das durch einen seitlichen Murenschutzwall (Anhang 1) gegen Murgangprozesse geschützt wird. Das gesamte Tal hinauf bis zum grossen Almatinka See führt eine Strasse, die das untere Ende des Kumbeltales über eine Brücke quert (Anhang 5). Potentiell bestehen also verschiedene gefährdete Stellen bei einem Gletscherseeausbruch. Abbildung 7 und 8 zeigen die verschiedenen Stellen.

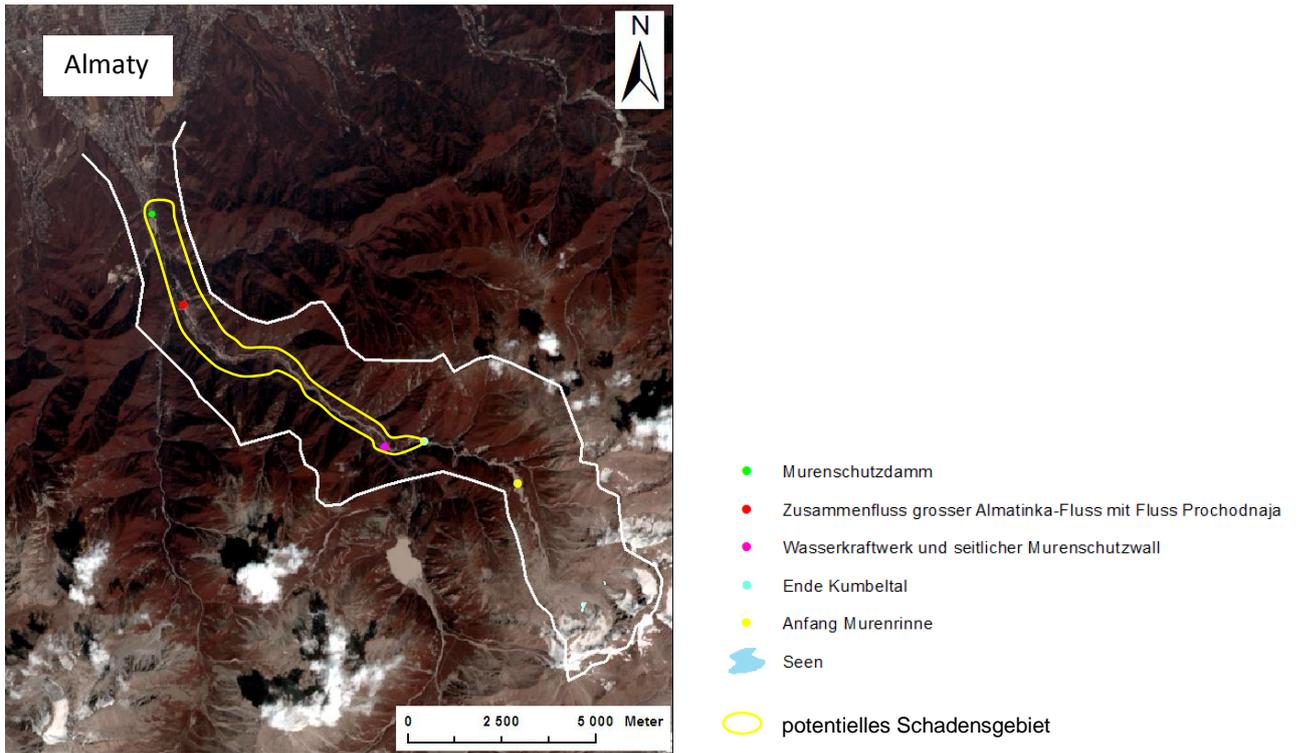


Abbildung 7: Infrastruktur im Untersuchungsgebiet und gefährdete Gebiete für Naturgefahren.

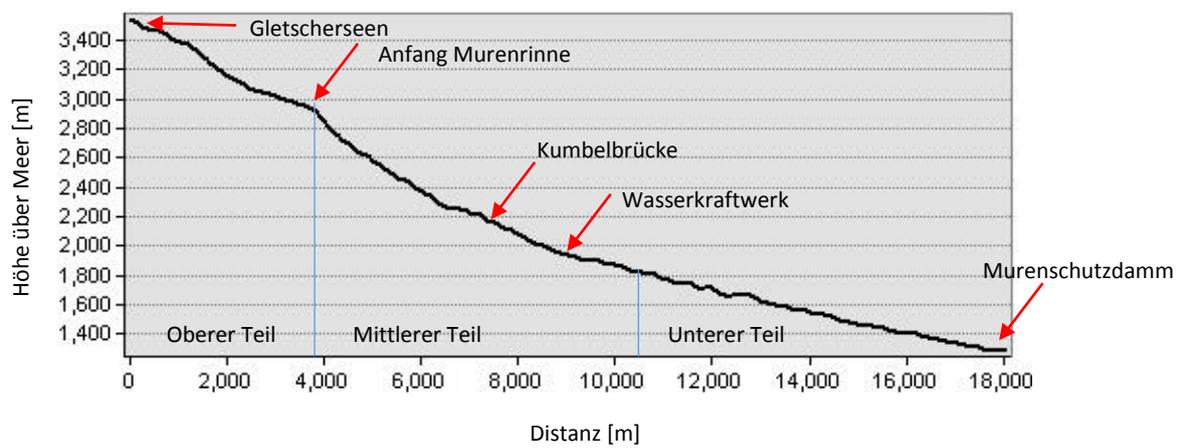


Abbildung 8: Profil zwischen Gletscherseen und Murenschutzdamm vor der Stadt Almaty mit den drei unterschiedenen Zonen.

## 2. Was ist eine Risikoanalyse?

Um diese Frage zufriedenstellend zu beantworten, wird hier zuerst die Bedeutung des Risiko-Begriffes erarbeitet und die Einbettung der Risikoanalyse in die Risikobegutachtung dargestellt. Zum Schluss wird der Bezug zum hier behandelten Untersuchungsgebiet hergestellt.

### 2.1 Begriffsdefinition Risiko

Eine zusammenfassende Definition was Risiko im Naturgefahrenmanagement beinhaltet gibt Varnes (1984) (in van Westen 2006: 168):

*„the expected number of lives lost, persons injured, damage to property and disruption of economic activity due to a particular damaging phenomenon for a given area and reference period.“*

*“Die erwartete Anzahl Tote, Verletzte, der erwartete Sachschaden und Unterbruch der wirtschaftlichen Tätigkeit aufgrund eines zerstörenden Phänomens für ein bestimmtes Gebiet und eine bestimmte Referenzperiode.“*

Van Westen (2006) führt diese Definition weiter aus und definiert das Risiko als Kombination von Naturgefahr und Schadenspotential. Die Naturgefahr beinhaltet eine zeitliche und räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines natürlichen Prozesses, verbunden mit einer gewissen Intensität. Das Schadenspotential besteht aus der Verletzlichkeit von Objekten (z.B. Wohnhäuser, Schulen, Krankenhaus, Menschen, Tiere) und dem materiellen oder immateriellen Wert, der gefährdet ist.

### 2.2 Allgemeine Bestandteile einer Risikobetrachtung

Aufbauend auf der Risikodefinition im Naturgefahrenmanagement kann das Ziel einer Risikobegutachtung definiert und ein Konzept zur Risikobegutachtung erstellt werden.

Keiler und Fuchs (2007: 3) beschreiben das Ziel der Risikobegutachtung als „vorausschauende Perspektive, die es erlaubt, ex ante potentielle Auswirkungen natürlicher Prozesse abzuschätzen und adäquate, d.h. angemessene und angepasste Massnahmen einzuleiten“.

Das Kernkonzept einer Risikobegutachtung wird gemäss BAFU (1998), Kienholz et al. (2004), Bründl et al. (2009) und Hollenstein und Hess (2011) in 3 Unterbereiche aufgeteilt (Abb. 9), welche sich ergänzende Aspekte eines Risikos behandelt. In der Risikoanalyse werden Risiken durch die Abschätzung der Intensität und Auftretenswahrscheinlichkeit und das dadurch verbundene Schadenspotential erkannt. In der Risikobewertung gilt es, die Risiken zu bewerten. In diesem Schritt wird angestrebt, zu entscheiden, wo Massnahmen aufgrund des möglichen Risikos vorgenommen werden müssen. Im Risikomanagement werden, basierend auf den Ergebnissen der Risikobewertung und Risikoanalyse, präventive Massnahmen (z.B. raumplanerisch, technisch oder über ein Frühwarnsystem) zur Risiko- und Schadensminimierung getroffen (BAFU, 1998, Keiler und Fuchs 2007). Hollenstein und Hess (2011) nennen die Faktoren „technische Machbarkeit“, „Rechtmässigkeit“, „Effizienz und Effektivität“, „Nachhaltigkeit und Sozialverträglichkeit“ als entscheidende Faktoren für die Wahl der Massnahmenplanung. Ein umfassenderes Risikokonzept enthält auch Strategien und Pläne für den Wiederaufbau nach einem Ereignis und für die Ereignisanalyse (Keiler und Fuchs 2007, PLANAT 2014 <http://www.planat.ch/de/fachleute/risikomanagement/>), auf welche hier nicht weiter

eingegangen wird. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Risikoanalyse gelegt. Daher wird im Folgenden nur die Risikoanalyse etwas genauer behandelt. Angelehnt an diese Risikoanalyse werden mögliche weiterführende Analysen und notwendige Massnahmen besprochen. Dieser Bereich ist dem Teilbereich Risikomanagement zugeordnet.

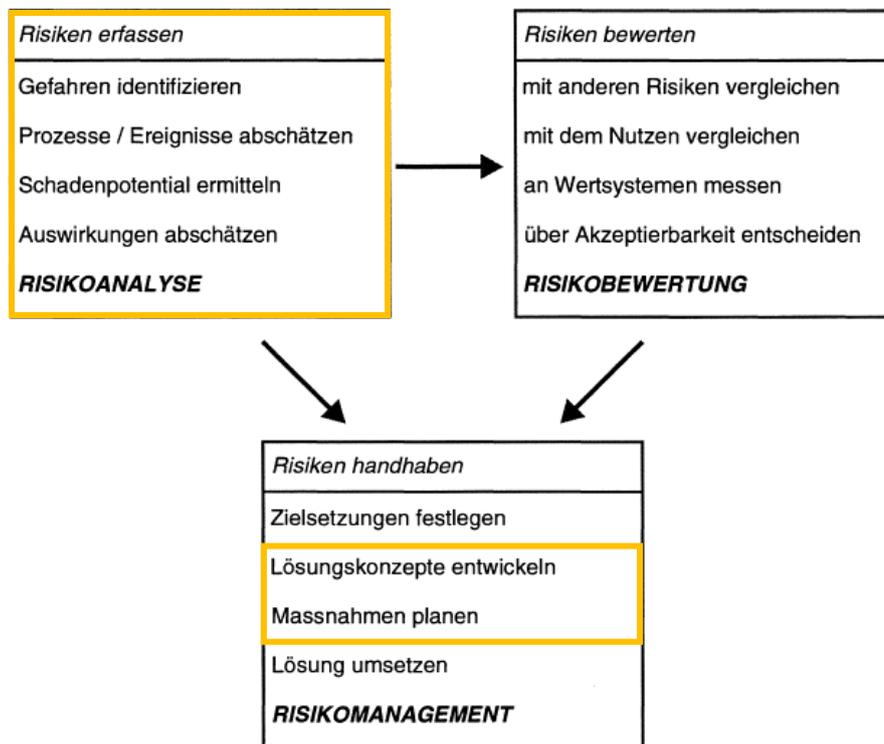


Abbildung 9: Bestandteile einer Risikobetrachtung mit den in dieser Arbeit behandelten Teilbereichen (orange).  
(Quelle: BAFU 1998)

## 2.3 Risikoanalyse

Folgende aufeinanderfolgende Unterbereiche beinhaltet eine Risikoanalyse (nach BAFU 1998):

- **Beschreibung und Abgrenzung des Untersuchungsobjektes und Gefahrenidentifikation:**  
Dies beinhaltet die geographische Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, die Beschreibung der Systembedingungen und die Definition der Gefahrenprozesse und Schadensobjekte, welche beurteilt werden sollen.
- **Gefahrenbeurteilung und Prozessabschätzung bezüglich Ausmass und Häufigkeit:**  
Dies beinhaltet die Aufarbeitung der historischen und potentiell neuen Start-, Transit- und Ablagerungsgebiete als auch die beobachtete Auftrittshäufigkeit, Intensität und mögliche Auftrittswahrscheinlichkeit.
- **Analyse der potentiell betroffenen Schadensobjekte:**  
Basierend auf den ersten beiden Schritten muss evaluiert werden, welche sensiblen Bereiche gefährdet sind. Hier sollte je nach Untersuchungsgebiet neben der räumlichen Abgrenzung auch eine zeitliche Komponente miteinbezogen werden. Diese zeitliche Komponente nimmt sowohl Bezug auf den Gefahrenprozess als auch auf die gefährdeten Gebiete. Saisonale

Nutzungsschwankungen der gefährdeten Gebiete verändern das Risiko zum Beispiel ebenfalls saisonal.

- *Abschätzung der zu erwartenden Auswirkungen der Ereignisse:*

Dies beinhaltet die Beurteilung der möglichen Schäden und als Schlussfolgerung das Risiko, welches für ein Objekt oder Gebiet besteht.

In dieser Arbeit wird auf die Schritte 1-3 einer Risikoanalyse eingegangen. Aufgrund der verfügbaren Datengrundlage und den Unsicherheiten ist es nicht möglich, Teilschritt 4 aussagekräftig zu behandeln. Teilschritt 4 wird in der Literatur (z.B. Schaub et al. 2013) momentan als schwierig zu bestimmen beschrieben.

Das zuvor beschriebene allgemeine Konzept der Risikoanalyse wird in Schaub et al. (2013) spezifisch auf die Gefahr Gletschersee übertragen und beschrieben. Dieses Konzept wird, mit Einbezug des Schemas von Huggel et al. (2004) für Gletscherseen (Abb. 10) auf die hier vorliegende Fallstudie übertragen. Ergänzt wird dieses Schema durch die qualitative Analyse der Ausbruchsgefährdung nach Huggel et al. (2004) und Wang et al. (2012a) und der Evaluation der Reichweite über einen modellbasierten Ansatz mit den Modellen MSF und RAMMS. Ein Fallbeispiel für die hier angewandte Methodik ist in Worni et al. (2013) zu finden. Huggel (2004) gibt eine sehr schöne Übersicht über die Breite der miteinzubeziehenden Faktoren und mögliche Methodik für die Gefahrenabschätzung als Teil der Risikoanalyse.

## **2.4 Herausforderungen für Prognosen**

Wie das BAFU (1998) und auch Keiler und Fuchs (2007) beschreiben, basiert die Risikoanalyse auf historischen Daten, versucht aber oft mit Blick in die Zukunft das Risiko abzuschätzen. Dies bringt demnach gemäss BAFU (1998) und Keiler und Fuchs (2007) drei zentrale Probleme:

- Die historische Zeitreihe garantiert nicht, dass alle möglichen Intensitäten einer Naturgefahr unter bestimmten Systembedingungen beinhaltet sind.
- Prognostizierte zukünftige Ereignisse, welche auf diesen Daten basieren, besitzen nur Gültigkeit, unter der Annahme dass keine Systemveränderungen passiert sind.
- Die für die Risikoanalyse benutzten Modelle sind vereinfachte Abbildungen der komplexen Realität und nicht alle wichtigen Faktoren können zufriedenstellend abgeschätzt werden.

Die Möglichkeit, dass gewisse mögliche Extremereignisse nicht aufgezeichnet sind und die Tatsache, dass Systemveränderungen, insbesondere unter den sich ändernden klimatischen Bedingungen, stattgefunden haben und stattfinden, führen zu Unsicherheiten in der prognostischen Risikoanalyse. Die notwendige Abstraktion der Realität und Zusammenfassung auf zentrale Parameter bringen weitere Unsicherheiten in die Ergebnisse einer Risikoanalyse. Die Ergebnisse aus einer Risikoanalyse sollten daher bei der weiterführenden Interpretation immer auf die drei Problematiken kritisch reflektiert werden. Mit diesen Herausforderungen ist auch das vorliegende Fallbeispiel konfrontiert. Dies umso mehr, da Moränenseeausbrüche oft einmalige Ereignisse sind, demnach nicht häufig auftreten und somit die Datengrundlage generell spärlich ausfällt.



### 3. Abflussmodelle für die Risikoanalyse

#### 3.1 Modified-Single-Flow Modell (MSF)

Das MSF-Modell wurde von Huggel et al. (2003) erstmals beschrieben und in der Arbeit für die Modellierung von Gletscherseeausbrüchen in der Schweiz angewendet. Dieses Modell kann den Fliessweg von Murgängen und Schlammströmen modellieren und eignet sich gut für eine erste Gefährdungsabschätzung auf regionaler Skala.

Für die Modellierung braucht das Modell als Eingangsdatensatz lediglich ein digitales Höhenmodell und eine definierte Startzone für den Murgang. Dies macht das Modell auch brauchbar für Regionen, in denen kaum oder keine Felddaten vorhanden oder schwierig zu erheben sind. Die Berechnung des Fliessweges basiert auf dem D8-Algorithmus (O'Callaghan und Mark 1984), welcher durch Huggel et al. (2003) so modifiziert wurde, dass die Fliesscharakteristik von Murgängen besser modelliert werden kann. Die modifizierte Version lässt eine Abweichung vom steilsten Gradienten bis +/- 45° zu. Diese Abänderung begründet Huggel et al. (2003) damit, dass Murgänge in flacheren Bereichen wie zum Beispiel Ablagerungskegel mehr divergierenden Charakter haben als reines Wasser. Es ist dabei eine Kostenfunktion für die Abweichung vom steilsten Gradienten implementiert. Somit ist eine Abweichung vom steilsten Gradienten zwar möglich, wird aber durch die Kostenfunktion erschwert. Je grösser die Abweichung vom steilsten Gradienten, desto höher die Kosten, was bedeutet, dass die Resistenz, um dort hinzufliessen, erhöht ist. Ebenfalls werden mit zunehmender Distanz zur Startzone Kosten über eine implementiert Kostenfunktion generiert. Dadurch erhält jede Zelle einen Wert, abhängig von den generierten Kosten in horizontaler und lateraler Richtung. Durch die Division der Horizontaldistanz (H) zwischen Zelle und Startzelle durch den Kostenwert (K) der Zelle wird ein Wahrscheinlichkeitswert (P), dass diese Zelle vom Murgang betroffen ist, für die Zelle erhalten.

$$P_{(i)} = H_{(i)} / K_{(i)} ; \quad i = \text{Zellenindex} \quad (3.1)$$

Dadurch kann als Resultat eine Wahrscheinlichkeitsangabe, ob ein Pixel vom Murgang betroffen ist oder nicht, gemacht werden. Diese Wahrscheinlichkeitsangabe ist jedoch nur im qualitativen Sinne und nicht im quantitativen Sinne zu verstehen.

Der Fliessweg wird von der Startzone (eine oder mehrere Zellen) abwärts über das ganze DHM gerechnet, solange es eine Zelle gibt, die tiefer liegt als die Ausflusszelle. Deshalb folgt das MSF Modell einem „worst-case“-Szenario Prinzip bezüglich Auslaufdistanz des Murganges. Das einzige Stoppkriterium geht über die Definition einer kritischen Neigung, bei deren Unterschreitung das Modell das Weiterfliessen des modellierten Murganges abbricht. Wird also keine kritische Neigung definiert, so fliesst der modellierte Murgang durch alle Zellen, die potentiell als Fliessweg berechnet wurden. Die kritische Neigung ist dabei die Neigung zwischen Startzelle und Zielzelle:

$$\text{Neigung} = (h_{\text{start}} - h_{\text{end}}) / (x_{\text{start}} - x_{\text{end}}) ; \quad h = \text{Vertikaldistanz}, x = \text{Horizontaldistanz} \quad (3.2)$$

Die Evaluation durch Huggel et al. (2003) an Gletscherseeausbrüchen in der Schweiz haben gezeigt, dass die kritische Neigung für die Auslaufdistanz bei ungefähr 11° liegt, erste Ablagerungen können aber bereits bei ungefähr 14° auftreten.

Dass zuerst der gesamte potentielle Fliessweg von der Startzone bis zum tiefsten Punkt im DHM berechnet wird, bringt einen Nachteil mit, der bei der Resultatauswertung der Modellierung dringend miteinbezogen werden muss. Wird ein Murgang mit Neigungskriterium modelliert, so erhält man ein Resultat, das alle Gebiete anzeigt, welche eine grössere Neigung als die kritische Neigung aufweisen. So kann es passieren, dass zwei Zonen, die als vom Murgang betroffen modelliert wurden, mehrere hundert Meter auseinander liegen können. Dies bedeutet, dass im Anschluss evaluiert werden muss, wie wahrscheinlich es ist bzw. ab welchem Volumen ein Murgang die dazwischenliegende Strecke überwinden und weiterfliessen kann, oder ob der Murgang beim „Unterbruch“ stecken bleibt. Ein weiterer Punkt, der in diesem Modell nicht integriert ist, ist die Möglichkeit der Fliesstransformation. Eine Fliesstransformation bedeutet eine Änderung der kritischen Neigung. Solche Stellen, wo eine Fliesstransformation möglicherweise stattfindet, sollen hier als neue Startzonen definiert und ein neuer Murgang mit neuer kritischen Neigung ab dieser Stelle modelliert werden.

Für ein gutes Resultat mit dem MSF Modell ist ein Höhenmodell mit guter Qualität entscheidend. Entscheidend daher, weil das Modell wie zu Beginn erwähnt, neben einer definierten Startzone „nur“ ein Höhenmodell als Eingangsdatensatz benötigt. Ungenügende Auflösung, Qualität und Genauigkeit haben starken Einfluss auf das Resultat (z.B. Stolz und Huggel 2008). Eine ungenügende Auflösung kann zum Beispiel zu einer ungenügenden Repräsentation von geomorphologischen Strukturen (z.B. Abflussrinnen) führen. Dies bedeutet zum Beispiel, dass der Murgang zu stark divergierenden Charakter hat im Modellierungsergebnis, im Gegensatz zur Realität. Eine zu hohe Auflösung kann aber auch negativen Einfluss auf das Resultat haben, in dem durch die gute Repräsentation von kleineren Unebenheiten der Murgang frühzeitig im Modell stecken bleiben kann. In der Realität hat der Murgang durchaus genügend Energie um gewisse Unebenheiten zu überfließen.

### **3.2 Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS)**

Folgende Beschreibung von RAMMS basiert auf den Arbeiten von Bartelt (1999), Christen et al. (2010), Graf und McArdell (2011), Mergili et al. (2011) und Hussin et al. (2012) und dem User Manual RAMMS (Bartelt et al. 2013) für Murgänge des SLF/WSL.

RAMMS gehört zu den numerischen Modellen und wurde am Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) der Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt. Es wurde ursprünglich für die Modellierung von Schneelawinen konstruiert, fand jedoch in den letzten Jahren auch Anwendung für andere Massenbewegungen wie Fels-Eislawinen, Lahars oder Murgänge. Für die Modellierung von Gletscherseeausbrüchen wurde RAMMS erstmals durch Mergili et al. (2011) verwendet. Für Murgänge wurde eine eigene RAMMS Version entwickelt, welche auch in dieser Arbeit verwendet wird.

RAMMS modelliert die Massenbewegung in x-,y- und z-Richtung und berechnet den Fliessweg, die Fliesshöhe, maximale Auslaufdistanz sowie die Fliessgeschwindigkeit und die Druckkraft auf mögliche Strukturen basierend auf der Voellmy-Salm Beziehung (Bartelt 1999, Hussin et al. 2012). Diese bezieht zwei Reibungskoeffizienten mit ein, welche die Fliesscharakteristik mit der Topographie und einigen topographischen Parametern in Verbindung bringt. Die Bewegung selber wird über die beiden Parameter Fliesshöhe und mittlere Fliessgeschwindigkeit definiert. Die Bewegung erfolgt über die

Strecke aber un stetig und nichtuniform, das heisst die Fliessgeschwindigkeit als auch die Fliesshöhe kann über den Fliessweg variieren. Auch die neue Sedimentaufnahme oder zwischenzeitliche Sedimentablagerung während der Bewegung ist vor allem bei Murgängen zentral, denn Startvolumen und Endvolumen können grosse Differenzen aufweisen. In der Benutzerversion kann dieser Dynamik nur geringfügig über die Reibungskoeffizienten Rechnung getragen werden. Das Startvolumen entspricht jedoch dem Endvolumen. Stellen, wo eher Akkumulation und somit Sedimentverlust oder Erosion und Sedimentaufnahme stattfindet, können über die berechneten Parameter Fliesshöhe und Fliessgeschwindigkeit abgeleitet werden. In einer Testversion wird versucht, der Dynamik der Massenbewegung auf ihrem Weg talwärts besser Rechnung zu tragen, indem in RAMMS eine Beziehung für die Sedimenterosion und die Energieänderung im Fliessweg implementiert (random kinetic energy model) wurde. Dadurch kann auch der über die Strecke variable Sedimenttransport oder die Sedimentablagerung mitintegriert werden. Dies könnte bei erfolgreicher Implementierung in die Benutzerversion und Validierung in Zukunft zur Verbesserung der Modellierung von Murgängen führen. Ein grosser Pluspunkt gegenüber dem MSF ist, dass eine mögliche Fliesstransformation über die Reibungskoeffizienten miteinbezogen werden kann.

Die beiden Reibungskoeffizienten sind die geschwindigkeitsunabhängige coulomb Reibung und die geschwindigkeitsabhängige turbulente Reibung, welche sich zum Quadrat der Fliessgeschwindigkeit ändert. Vorgeschlagene Werte für Murgänge sind für die coulomb Reibung 0.1-0.3 (Reibung nur proportional abhängig von der Normalkraft und daher vor allem abhängig von der Grösse des Murganges und dessen Zusammensetzung) und für die turbulente Reibung 100-400  $m/s^2$  (Graf und McArdeil 2011) (Reibung abhängig von der Geschwindigkeit und somit von der Untergrundrauigkeit). Die WSL empfiehlt im RAMMS Manual einen Wertebereich von 0.05-0.4 für die coulomb Reibung und 100-200  $m/s^2$  für granulare Murgänge und 200-1000  $m/s^2$  für flüssigere Murgänge für die turbulente Reibung. Eher hyperkonzentrierte Fluten oder durch Feinsediment dominierte Murgänge können aber Werte bis 1000  $m/s^2$  oder mehr für die turbulente Reibung annehmen (RAMMS Manual). Auch die Werte in Quan Luna et al. (2010) (in Hussin et al. (2012)) liegen in diesem Bereich. Die coulomb Reibung beeinflusst die modellierte Murgangdynamik kurz bevor er stoppt, die turbulente Reibung während dem schnelleren Fliessen des Murganges.(RAMMS Manual)

RAMMS bietet zwei Ausbruchsmechanismen an: der Blockrelease und der Hydrograph releas. Durch den Blockreleas wird das gesamte Ausbruchvolumen gleichzeitig ausgelöst. Beim „hydrograph releas“ wird die Ausbruchscharakteristik über eine Abflusskurve (Hydrograph) definiert. Ein Seeausbruch muss als Ausbruch über eine Abflusskurve definiert werden. Ein Blockrelease würde mehr einen Hangmurgang abbilden, wo sich ein Stück des Hanges loslöst und abrutscht.

## 4. Daten

Für die vorliegende Arbeit wurden verschiedene Daten benötigt. Über die benötigten Daten soll hier ein kurzer Überblick gegeben werden.

### 4.1 Fernerkundungsdaten

Für die Modellierung wurden drei unterschiedliche Höhenmodelle benutzt. Die Höhenmodelle liegen in Form von Rasterdaten vor. Da in den Höhenmodellen auch bauliche Strukturen erkennbar sind wie der Murenschutzdamm vor der Stadt Almaty, handelt es sich streng genommen um ein Oberflächenmodell.

#### 4.1.1 SRTM DHM

Eineder und Holzner (2000), Hall et al. (2005) und Frey und Paul (2012) geben eine gute Übersicht über den SRTM Datensatz. Das aus SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Daten berechnete Höhenmodell besitzt eine Pixelauflösung von 90x90m und ist frei verfügbar. Die SRTM Daten stammen aus dem Jahr 2000 und wurden mit einer Auflösung von 3 Arcsekunden aufgenommen. Dies liegt in der Größenordnung von 90 m, je nach Breitengrad. Für die hier durchgeführte Modellierung wurde das Höhenmodell auf 30x30m heruntergerechnet. Aufgrund der Aufnahmetechnik (Radar) ergeben sich in steiler Topographie geometrische Aufnahme-probleme (Radarschatten, Layover, Foreshortening). Dies führt zu Datenlöchern und ungenauer Topographie im Datensatz. Darum wurde eine sogenannte „void-filled“ Version des SRTM DHM herausgegeben, in dem die Datenlöcher durch verschiedene Interpolationsmethoden (vgl. Reuter et al. 2007) und, wo vorhanden, durch andere Höhendatensätze gefüllt wurden. Diese gefüllten Bereiche können dadurch stärkere Unstimmigkeiten in der Topographie aufweisen. Aufgrund der Lage und Topographie des Untersuchungsgebietes besteht die Möglichkeit für Datenlöcher im Untersuchungsgebiet und daher auch die Möglichkeit für Artefakte im Höhenmodell. Obwohl es streng genommen ein Oberflächenmodell ist, kann es abgesehen von der Aufnahmetechnik und –geometrie im Vergleich, zu aus optischen Daten generierten Oberflächenmodellen, zu Höhendifferenzen zwischen den Modellen kommen. Dies, weil Radarwellen Vegetation und auch Schnee zu einem gewissen Grad durchdringen können und somit andere Höhenwerte der gleichen Stelle zugewiesen werden.

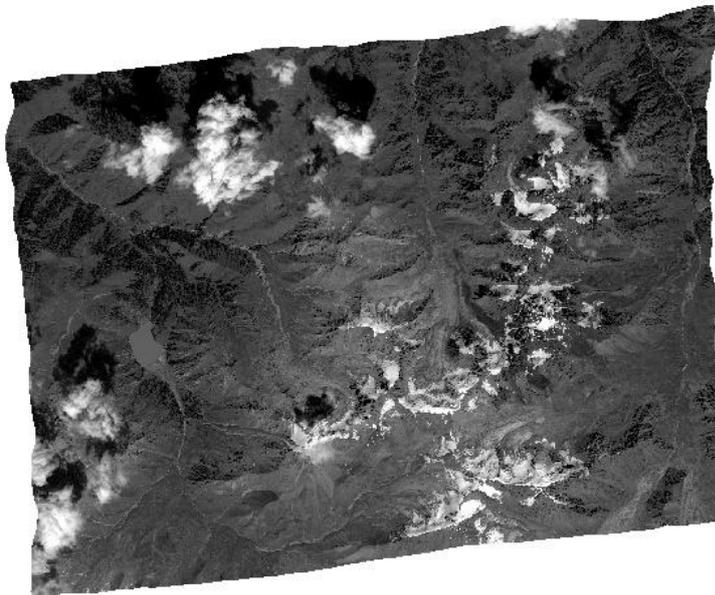
#### 4.1.2 ASTER GDEM Version 2

Eine Übersicht zum ASTER Datensatz geben Hirano et al. (2003) und Fujisada et al. (2005) und die Website <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>. Das ASTER GDEM wurde aus ASTER (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer) Daten an Bord des Terra Satelliten durch Zusammenarbeit von METI (Ministry of Economics, Trade and Industry) von Japan und der NASA erstellt. ASTER Daten sind optisch aufgenommene Daten. Dadurch ergeben sich Kontrast- und Wolkenprobleme für die Berechnung eines Höhenmodelles aus den Daten. Das ASTER GDEM Version 2 besitzt eine Pixelauflösung von 30x30m, die ursprünglichen ASTER Daten eine Auflösung von 15m. Version 2 wurde gegenüber Version 1 in der Auflösung, in der vertikalen und horizontalen Genauigkeit und bezüglich Artefakte verbessert. Gebiete mit Wolkenbedeckung wurden durch andere Datensätze gefüllt. Die Daten zur Berechnung des GDEM stammen aus den Jahren 2000 bis 2010. Aus welchem

Jahr oder welchen Jahren der Datensatz für die Berechnung des ASTER GDEM Version 2 für das Untersuchungsgebiet stammt, ist leider nicht bekannt.

#### 4.1.3 GeoEye DHM

Das dritte Höhenmodell wurde aus GeoEye Stereodaten von 2012 berechnet mit einer Auflösung von 5x5 m. Für die Modellierung wurde das DHM auf 30 Meter Pixelauflösung heruntergerechnet. GeoEye Daten gehören zu den momentan höchstmöglich aufgelösten, kommerziell verfügbaren Bildern (Aguilar et al. 2013). Die Studie von Aguilar et al. (2012) untersuchte die Lagegenauigkeit von einem GeoEye Stereobild und erhielt einen RMSE von 1.6m für multispektrale Stereobilder. Die für das hier verwendete Höhenmodell zugrunde liegenden GeoEye-Daten sind panchromatische Stereodaten und haben eine Pixelauflösung von 0.5 m. Im Bilddatensatz (Abb. 11) ist Wolkenschatten im Gebiet des aktuellen Sees zu beobachten, was wie bei der Qualitätsanalyse (Kapitel 5) erkannt, zu Ungenauigkeiten im berechneten Höhenmodell führt.



*Abbildung 11: Orthorektifizierte GeoEye-Aufnahme des oberen Teils des Untersuchungsgebietes mit Wolken und Wolkenschatten.*

#### 4.1.4 Satellitendaten

Neben Literatur sind auch Fernerkundungsdaten zur Gebietscharakterisierung hilfreich. Um die Gletscher- und Seentwicklung in den letzten Jahren zu beurteilen wurden Satellitenbilder von 1972, 1976, 1999, 2008 und 2013 benutzt.

## 4.2 Bathymetrische Daten

Bathymetrische Vermessungsdaten sind durch Echolottechnik aufgenommene Daten zur Grundtiefe in einem Gewässer. Für den See Sovetov bestehen solche Daten für das Jahr 2013 und 2014 und wurden durch das Geographische Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan aufgenommen und zur Verfügung gestellt (Abb. 12). Diese Daten wurden in die

Beschreibung der Gletscherseeentwicklung integriert. Sie erlauben die Ermittlung von sich verändernden Stellen im See sowie die morphometrische Veränderung des Sees zu erfassen.

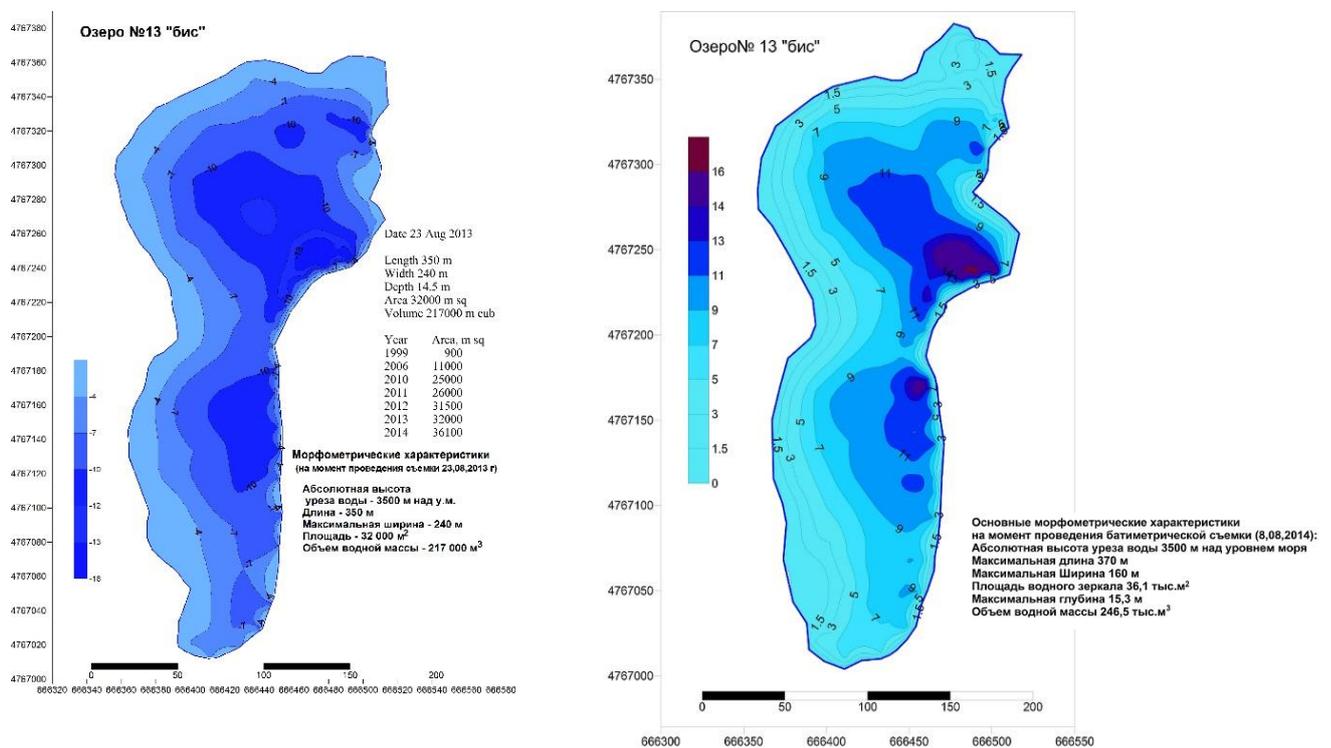


Abbildung 12: Bathymetrische Messungen vom Jahr 2013 (links) und 2014 (rechts) vom See Sovetov durch das geographische Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan.

### 4.3 Temperatur- und Niederschlagsdaten Tuyuksu

Vom Geographischen Institutes des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan wurden Temperatur- und Niederschlagsdaten von der Klimastation Tuyuksu vom Zeitraum 1972-2014 zur Verfügung gestellt. Die Daten lagen in 24h- und 3h-Intervalle vor. Diese wurden in die klimatische Beschreibung des Untersuchungsgebietes integriert.

### 4.4 Daten aus der Feldarbeit

Während den Feldarbeiten wurden GPS Punkte an wichtigen Stellen erhoben. Pro Punkt wurde das Mittel aus 1 Minute Messung mit einem Intervall von 5s gerechnet. Die Positionsgenauigkeit PDOP (Position Dilution of Precision), welche ein Mass für die Streuung der Messungen für einen Punkt und somit die räumliche Lagegenauigkeit beschreibt, wurde unter 2m gehalten. Die Punkte weisen einen horizontalen und vertikalen Fehler kleiner als 1m auf. Die Koordinatenwerte und Höhenwerte konnten daher als sehr vertrauenswürdig beurteilt werden. Die GPS Punkte wurden für die qualitative Analyse der Ausbruchgefährdung und für die Qualitätsanalyse der Höhenmodelle genutzt. Die GPS Punkte wurden mit dem MobileMapper 10 aufgenommen.

Eigens aufgenommene Fotos im Untersuchungsgebiet wurden für die Gebietsbeschreibung und – Analyse miteinbezogen. Diese sind vom Zeitraum 30. August bis 2. September 2014. Zusätzlich stand

ein Foto von 8. August 2014 durch das geographische Institut des Ministeriums für Bildung und Wissenschaft der Republik Kasachstan zur Verfügung.

#### **4.5 GIS-Daten zum Untersuchungsgebiet**

Basisdaten für die Gebietscharakterisierung und -analyse wurden von Tobias Bolch über sein nördlicher-Tien-Shan-GIS (2006) und weiteren GIS-Daten (2009 und 2014) zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten:

- Niederschlagsverteilung
- Temperaturverteilung
- Gletscherausdehnung zwischen 1979 und 1999
- Kartographische Basisdaten
- Permafrostverteilung
- GlabTop Modellergebnisse

## 5. Qualitätsanalyse der Höhenmodelle

Käab et al. (2005) betonen, dass der wichtigste Eingangsdatensatz für die Modellierung von Massenbewegungen das DHM ist, da diese Prozesse von der Reliefenergie abhängig sind und bezeichnet die Qualität des DHM als einer der entscheidendsten Faktoren für die Aussagekraft der Modellierungsergebnisse. Eine genaue Analyse der verwendeten Höhenmodelle bezüglich Auflösung, Artefakte und horizontaler und vertikaler Lagegenauigkeit ist daher essentiell. Für die in dieser Arbeit benutzten Modellierungsprogramme trifft diese Aussage zu und eine Qualitätsanalyse ist unumgänglich. Da der GeoEye Datensatz kurz vor Abgabe verfügbar war, wurde er nur Teilweise in die Qualitätsanalyse miteinbezogen. Eine ausführlichere Evaluation von SRTM und ASTER Datensätzen für den nördlichen Tien Shan geben Bolch et al. (2005) und Peters (2009). Die hier verwendeten Höhenmodelle werden für folgende Punkte auf ihre Qualität geprüft (Grundlage: Hengl und Reuter 2007):

- Repräsentation der aktuellen Topographie
- Höhenfehler
- Neigungsfehler
- Artefakte
- Probleme durch die Aufnahmegeometrie

### 5.1 Repräsentation der aktuellen Topographie

#### 5.1.1 Aufnahmedatum

Das ASTER GDEM2 und das SRTM DHM basieren auf Daten von den Jahren 2000 bis 2010 im Fall des ASTER GDEM2 und im Fall des SRTM DHM vom Jahr 2000. Die Topographie im Untersuchungsgebiet kann daher mehr oder auch weniger die aktuellen Verhältnisse wiedergeben. Das Untersuchungsgebiet unterliegt vor allem im oberen Teil durch die Gletscherbewegung, den Gletscherrückzug, die Hangbewegungen durch periglaziale Prozesse und der Seeentwicklung starken Veränderungen und wird somit vermutlich Stellen aufweisen, wo die Topographie im DHM nicht mehr mit der Realität übereinstimmt. Falls Daten vor 2006 benutzt wurden, sind die Ablagerungen des Murganges 2006 nicht in der Topographie mitinbegriffen und Abweichungen in der aktuellen Topographie im unteren Teil des Untersuchungsgebietes vorhanden. Mögliche Ungenauigkeiten durch Wolken vor allem im oberen Teil des Untersuchungsgebietes können nicht ausgeschlossen werden.

Im Falle des SRTM DHM stimmen der obere Teil und die Ablagerungsbereiche des Murganges 2006 nicht mehr mit der Realität überein. Die Berechnung des Hillshades und Neigungskarte für die beiden Höhenmodelle zeigen, dass keine grösseren Artefakte oder systematischen Fehler vorliegen.

Der GeoEye Datensatz, mit dem das höchst aufgelöste DHM berechnet wurde, stammt aus dem Jahr 2012. Der Datensatz liegt für den oberen Bereich des Kumbeltales vor. Die DHM Topographie sollte die reale Topographie gut wiedergeben. Die Berechnung des Hillshades und der Neigungskarte (Abb. 13) zeigen starke Artefakte vor allem an den Rändern und bei steiler Topographie. Im für die Modellierung wichtigen Bereich ist ein markantes Artefakt auf dem Moränendamm des aktuellen Sees erkennbar (Kreismarkierung Abb. 13). Beim Vergleich mit dem Bilddatensatz zeigt sich, dass die Artefakte (falsche Höhenangaben) im DHM auf Wolkenbedeckung und Wolkenschatten zurück zu führen sind. Die Neigungskarte zeigt, dass keine systematischen Fehler beobachtbar sind, wie zum Beispiel sprunghafte Änderungen in den Werten, welche durch Streifenmuster erkennbar wären.

So stellen sich vor allem grössere Unsicherheiten bei der Modellierung von Eisabbrüchen als Ausbruchstrigger und bei der maximalen Reichweite ein. Die Ausbruchzone selber und die Transitzone bis zur Ablagerungszone sollten im Allgemeinen die wesentliche Topographie widerspiegeln.

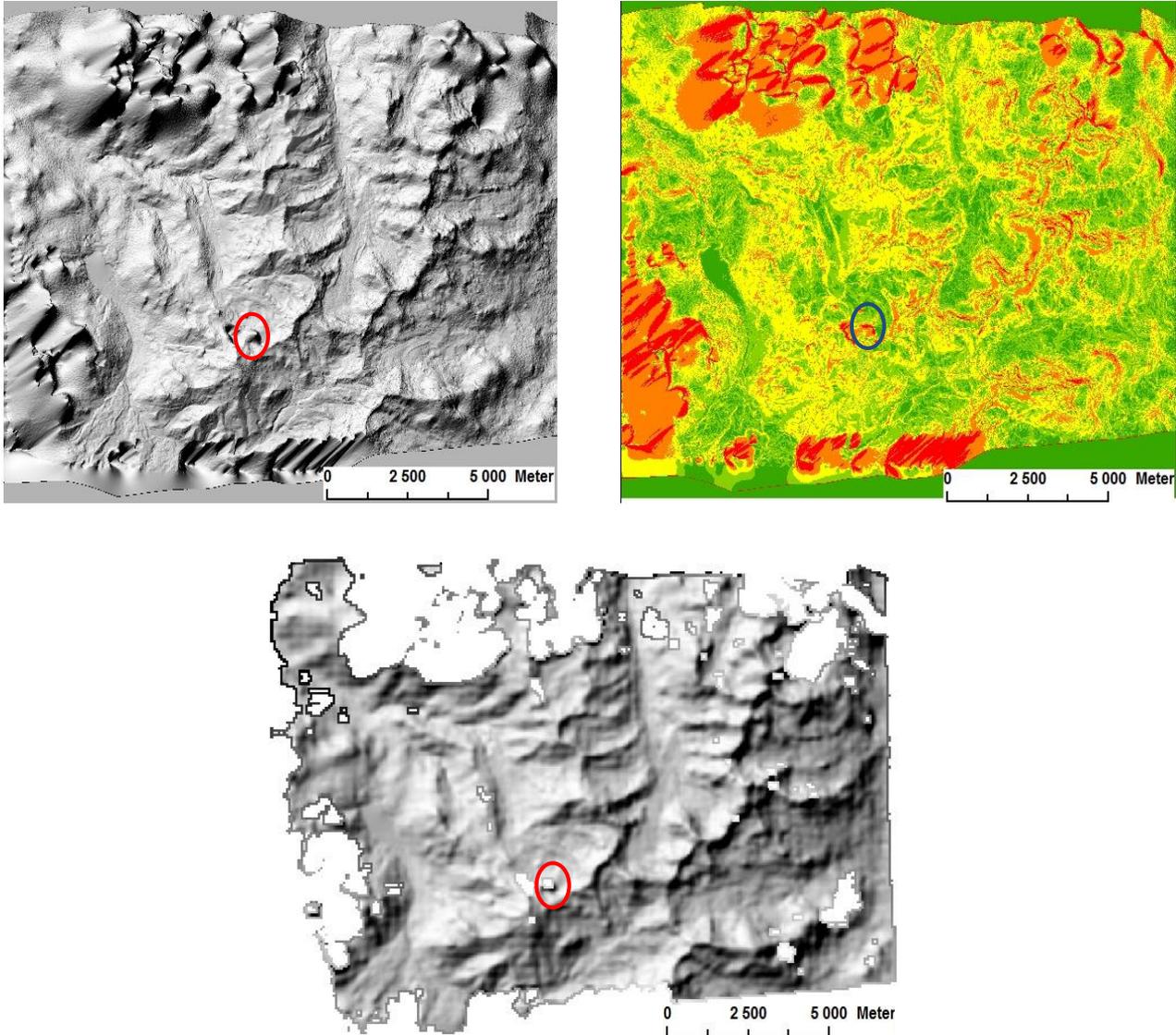


Abbildung 13: Hillshade und Neigungskarte mit sichtbaren Artefakte (falsche Höhenangaben) aufgrund von Wolken und Wolkenschatten (oben) und korrigiertes Hillshade (unten). Kreismarkierung: Artefakt am Moränendamm.

### 5.1.2 Auflösung

Strukturen welche kleinere Dimensionen aufweisen, als die Auflösung des Höhenmodelles und der zugrunde liegenden Daten, können nur ungenügend im Höhenmodell repräsentiert werden. Für das Untersuchungsgebiet bedeutet dies mehrere problematische Zonen. Die Transitzone ist eine enge und tief einschneidende Murenrinne. Eine Auflösung von 90m für das SRTM und 30m für das ASTER GDEM2 führen zu Schwierigkeiten bei der repräsentativen Abbildung der realen Topographie. Dies wird zusätzlich noch erschwert, da seitlich an die Murenrinne direkt steile Hänge anschliessen. Im Bereich des Moränensees, wo feine Strukturen wie der Oberflächenabfluss entlang des Morändammes und der Bachlauf vorhanden sind, kommt es mit diesen Pixelauflösungen ebenfalls zur schlechteren

Abbildung der Realität. Im unteren Talbereich vor dem Murenschutzdamm hat sich eine lichte Busch- und Baumvegetation entwickelt, welche bei grober Auflösung zu einer erhöhten Topographie vor allem für Höhenmodelle aus optischen Daten wie das ASTER GDEM führen kann. Im unteren Teil, wo sich das Tal verbreitert, verläuft der Fluss in Murenablagerungen und in einer diffusen Struktur unterhalb des Auflösungsvermögens der Höhenmodelle. Problematisch aufgrund der Dimensionen sind auch die Repräsentation des Murenschutzdammes, sowie der seitliche Murenschutzwall und die Brücke am unteren Ende des Kumbeltales (Abb. 14).

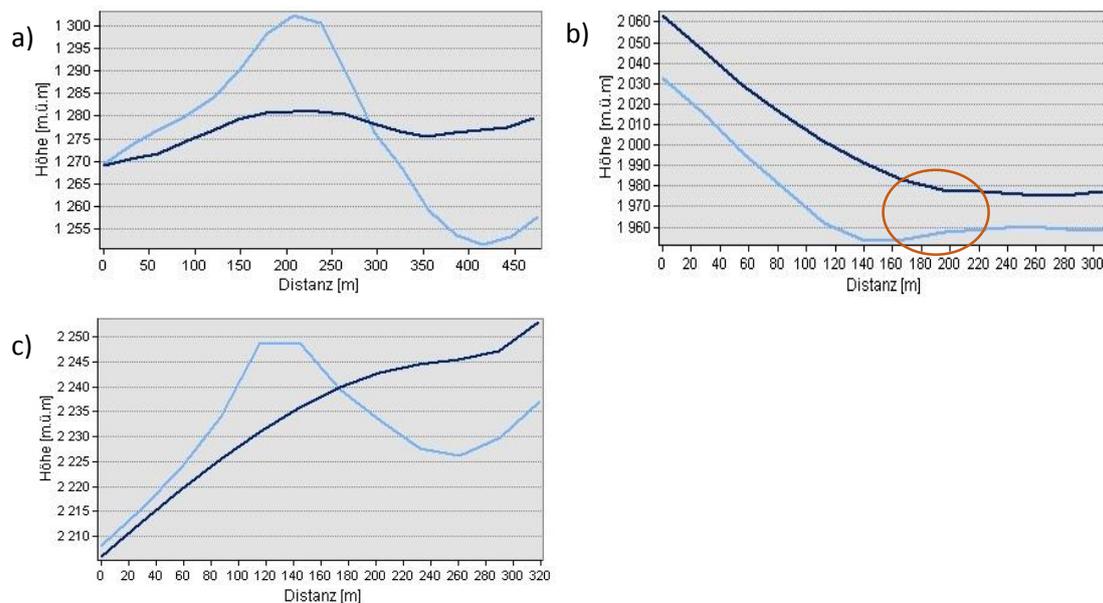


Abbildung 14: Abbildung des Murenschutzdammes (a), des seitlichen Murenschutzwalles (orange Markierung) (b) und der Kumbelbrücke (c) im ASTER GDEM (hellblau) und SRTM DHM (dunkelblau).

## 5.2 Höhenfehler

Es wurde der Höhenfehler in Abhängigkeit von der Neigung, Exposition und Höhe in einem Höhenmodell und generell zwischen dem ASTER GDEM und dem SRTM DHM analysiert (z.B. Wang et al. 2012b).

### 5.2.1 Fehlerkarte

Für eine Fehlerkarte wurden die beiden Höhenmodelle mathematisch voneinander subtrahiert. Dabei wurde in diesem Fall das ASTER GDEM als Referenzmodell gewählt und das SRTM DHM vom ASTER GDEM subtrahiert. Damit eine Subtraktion erst möglich ist, müssen beide Höhenmodelle die gleiche Auflösung aufweisen und exakt übereinander liegen. Dafür wurde das ASTER GDEM mit der Nearest Neighbour Resampling Methode auf die Pixelauflösung des SRTM Datensatzes von 90x90 m umgerechnet. Es wurde die Nearest Neighbour Resampling Methode gewählt, da mit dieser Methode die ursprünglichen Höhenwerte beibehalten werden und so der Rohfehler zwischen den Höhenmodellen besser analysiert werden kann. Der neue ASTER GDEM Datensatz wies einen leichten Versatz von 20 m in Nord-Süd Richtung und 3 m in West-Ost Richtung auf, welcher korrigiert wurde. Die Fehlerkarte (Abb. 15a) zeigt eine Abhängigkeit zur Exposition. Dies deutet darauf hin, dass ein relativer Versatz zwischen den beiden Höhenmodellen vorliegt. Dieser wurde mit dem

Koregistrierungstool (durch T. Bolch zur Verfügung gestellt) nach Kääh (2005) und Nuth et al. (2011) korrigiert. Der bestimmte Versatz war in X-Richtung -7 m und in Y-Richtung -69 m für das ASTER GDEM. Um das ASTER GDEM um diese Werte zu verschieben, wurden das SRTM DHM auf 30 m heruntergerechnet. Nach der Verschiebung zeigte sich keine Expositionsabhängigkeit (Abb. 15b) mehr, und der Höhenfehler hat sich etwas verbessert (Tab. 4).

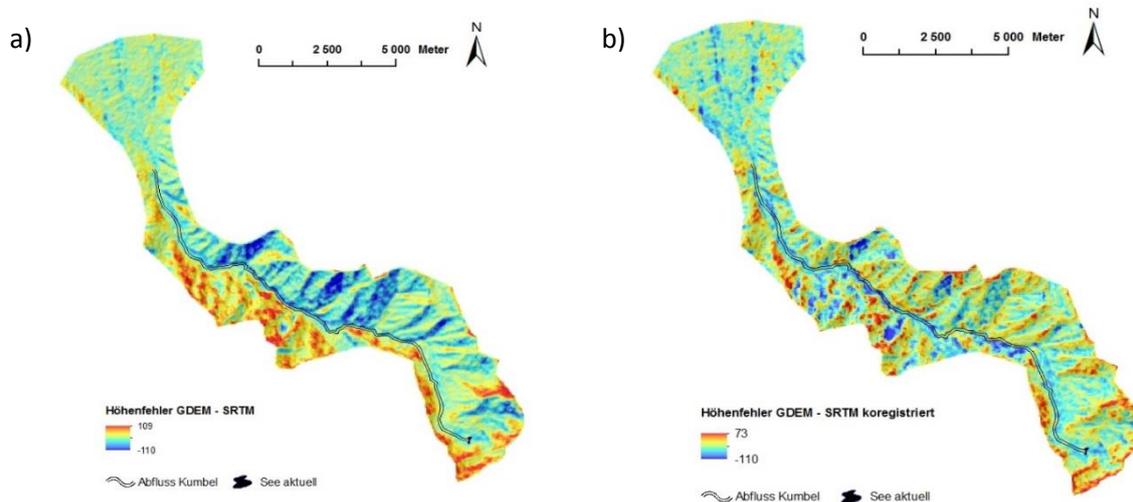


Abbildung 15: Höhendifferenzen ASTER GDEM – SRTM DHM in Meter a) Expositionabhängigkeit der Höhenfehler vor der Koregistrierung b) Höhenfehler nach der Koregistrierung.

Tabelle 4: Mittlerer, maximaler und minimaler Höhenfehler vor und nach der Koregistrierung sowie die Standardabweichung des Fehlers.

| Fehlerstatistik | Mittel [m] | Maximal [m] | Minimal [m] | STD  |
|-----------------|------------|-------------|-------------|------|
| GDEM_SRTM       | 0,5        | 109         | -110        | 27   |
| GDEM_SRTM_Koreg | -1,8       | 73          | -110        | 16,3 |

### 5.2.2 Scatterplot

Es wurden die Höhendifferenzen gegen die Höhe selber des ASTER GDEM und SRTM DEM Datensatzes sowie gegen die Hangneigung und die Exposition der beiden Datensätze aufgetragen (Anhang 18) (z.B. Nikolakopoulos et al. 2006, Fokuor und Maathuis 2012, Wang et al. 2012b). Dadurch konnte eine allfällige Abhängigkeit der Höhendifferenzen zur Höhe, Hangneigung oder Exposition aufgedeckt werden. Die in der Fehlerkarte ersichtliche Expositionsabhängigkeit wurde auch in den Scatterplot ersichtlich. Beide Datenprodukte zeigen dabei eine ähnliche Abhängigkeit. Die höchsten positiven Differenzen finden sich in einer südlichen Ausrichtung und erreichen ungefähr 100m maximal. Positive Differenzen bedeuten, dass SRTM DEM die Höhe unterschätzt in Bezug auf das ASTER GDEM. Die höchsten negativen Differenzen liegen in nach Norden (und Nordosten/Nordwesten) ausgerichteten Gebieten und erreichen ebenfalls ungefähr 100m maximal. Der Grossteil der Differenzwerte liegt zwischen -50/+50 m. Alle Expositionen zeigen eine diffuse Verteilung der Differenzwerte. Die Bandbreite der Differenzwerte je Exposition liegt zwischen knapp 100m und ungefähr 60m. Wang et al. (2012b) stellte durch den Vergleich vom ASTER GDEM und SRTM DHM mit einem Referenzmodelle fest, dass vor allem das SRTM DHM diese Expositionsabhängigkeit aufweist.

Ein unterschiedliches Verhalten der Differenzwerte ist auch in Bezug auf die Hangneigung festzustellen. Je grösser der Neigungswert, desto grösser ist die Streuung der Differenzwerte. Das bedeutet auch, dass bei grösserer Neigung auch grössere Abweichungen vorkommen. Die Differenzen können ab ungefähr 35° Neigung bis zu 200 m betragen. Im Scatterplot in dem die Werte des ganzen Rasters miteinbezogen wurden, zeigt sich eine leichte Tendenz zu negativen Differenzwerten. Daraus kann geschlossen werden, dass in steileren Gebieten die Höhe im SRTM DHM eher überschätzt wird. Durch das Auftragen der Höhe des DHM gegen die Höhendifferenzen kann geschlossen werden, dass in tieferen Lagen eher kleinere Höhendifferenzen vorliegen und mit zunehmender Höhe die Differenzwertstreuung zunimmt. Die Streuung bleibt jedoch ab einer ungefähren Höhe von 1500-1700 m.ü.m. gleich gross. Eine klare Abhängigkeit ist nicht ersichtlich. Der Fehlerbereich liegt zwischen -100 und 100 m wie bereits in der Fehlerstatistik für die Koregistrierung berechnet.

### 5.2.3 Vergleich mit GPS Daten

Die im Gelände gemessenen GPS Punkte werden Strichprobenartig zur Höhenfehlerbestimmung benutzt (Tab. 5 und 6). Dabei überschätzen sowohl das ASTER GDEM als auch das SRTM DHM die reale Höhe. Die Differenz zwischen SRTM DHM und ASTER GDEM widerspiegeln den expositionsabhängigen Fehler, da GPS Punkte an West- und Osthängen gemessen wurden. Der GeoEye Datensatz weist in Gebieten ohne Artefakte die kleinsten Differenzen zu den GPS Messpunkten auf. Aufgrund der Artefakte sind die Maximalen Abweichungen sehr hoch. Die mittlere Abweichung ist aber mit -13.6 m einiges tiefer als für die des ASTER und SRTM Datensatzes. Im Gegensatz zum SRTM und ASTER Datensatz scheinen die GeoEye Daten die reale Topographie im Mittel zu unterschätzen. Dies ist aber wegen der hohen maximalen Abweichung der Fall, da das Mittel anfällig auf Extremwerte ist. Der Median würde einen positiven Wert erzeugen.

Tabelle 5: a) Höhenwerte [m.ü.m] im SRTM, ASTER und GeoEye Höhenmodell an den GPS Koordinatenpunkten und die Höhenwerte der GPS Messungen selber b) Höhenwertdifferenzen zwischen den Höhenmodellen ASTER GDEM, SRTM DHM und GeoEye sowie zu den GPS Punkten. Positive Abweichungen sind rot markiert, negative sind blau markiert.

|               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>SRTM</b>   | 3605   | 3517   | 3618   | 3490   | 3535   | 3547   | 3542   | 3796   | 3715   | 3715   | 3514   | 3425   | 3439   |
| <b>ASTER</b>  | 3596   | 3507   | 3616   | 3470   | 3533   | 3548   | 3531   | 3802   | 3731   | 3731   | 3531   | 3465   | 3465   |
| <b>GeoEye</b> | 3559   | 3470   | 3585   | 3449   | 3504   | 3512   | 3519   | 3760   | 3704   | 3658   | 3382   | 3400   | n.d    |
| <b>GPS</b>    | 3544,2 | 3453,9 | 3583,9 | 3445,1 | 3491,9 | 3495,5 | 3509,5 | 3753,8 | 3706,2 | 3696,2 | 3528,2 | 3456,6 | 3416,6 |

|                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |        |       |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|-------|------|
| <b>ASTER_GPS</b>  | 51,8 | 53,1 | 32,1 | 24,9 | 41,1 | 52,5 | 21,5 | 48,2 | 24,8 | 34,8  | 2,8    | 8,4   | 48,4 |
| <b>SRTM_GPS</b>   | 60,8 | 63,1 | 34,1 | 44,9 | 43,1 | 51,5 | 32,5 | 42,2 | 8,8  | 18,8  | -14,2  | -31,6 | 22,4 |
| <b>SRTM_ASTER</b> | 9    | 10   | 2    | 20   | 2    | -1   | 11   | -6   | -16  | -16   | -17    | -40   | -26  |
| <b>GeoEye_GPS</b> | 14,8 | 16,1 | 1,1  | 3,9  | 12,1 | 16,5 | 9,5  | 6,2  | -2,2 | -38,2 | -146,2 | -56,6 | n.d  |

Tabelle 6: Differenzenstatistik aus den erhaltenen Werten aus Tabelle 3b. Das GeoEye ist in Bezug zu den GPS Daten am genauesten. Relativ sind die beiden Höhenmodelle ASTER GDEM und SRTM DHM am besten.

| Differenzen [m] | Maximal | Minimal | Mittel | RMSE | NRMSE |
|-----------------|---------|---------|--------|------|-------|
| ASTER_GPS       | 53,1    | 2,8     | 34,2   | 37,9 | 75,4% |
| SRTM_GPS        | 63,1    | 8,8     | 29,0   | 39,6 | 72,9% |
| SRTM_ASTER      | -40,0   | 1,0     | -5,2   | 17,2 | 44%   |
| GeoEye_GPS      | 146,2   | 1,1     | -13,6  | 47,5 | 32,7% |

#### 5.2.4 Höhenkorrelation und Häufigkeitsverteilung

Um die Übereinstimmigkeit der beiden Höhenmodelle zu evaluieren, wurden neben der Fehlerkarte auch die Höhen der beiden Höhenmodelle gegeneinander aufgetragen, um die Korrelation abschätzen zu können (Abb. 16) (z.B. Nikolakopoulos et al. 2006, Fokuor und Maathuis 2012). Der Scatterplot zeigt auf, dass die Korrelation zwischen ASTER GDEM und SRTM DEM gut ausgebildet ist und keine Bereich mit diffuser Streuung vorkommen. Auch die Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte im ASTER GDEM und SRTM DHM (Anhang 17) weisen ein übereinstimmendes Muster auf. Dies sowohl im Datensatz für das Untersuchungsgebiet als auch im Datensatz des gesamten Rasters. Es handelt sich dabei um eine unimodale, rechtsschiefe Verteilung mit einem leichten nach links laufenden Tailing. Das heisst das ASTER GDEM unterschätzt im Vergleich zum SRTM die Höhe häufiger (Abb. 17). Diese Resultate erhielten auch Wang et al. (2012a) für ihr Studiengebiet im Südosten Tibets. Nach der Koregistration zeigte die Häufigkeitsverteilung (Anhang 17) der Höhendifferenzen, dass die maximalen Differenzen kleiner und die Verteilung enger wurde, ASTER aber immer noch die Höhe unterschätze gegenüber dem SRTM.

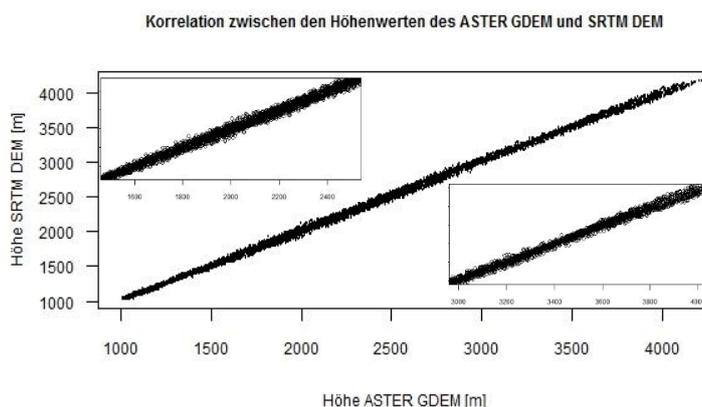


Abbildung 16: Korrelation zwischen den Höhenwerten des ASTER GDEM und des SRTM DHM im Untersuchungsgebiet.

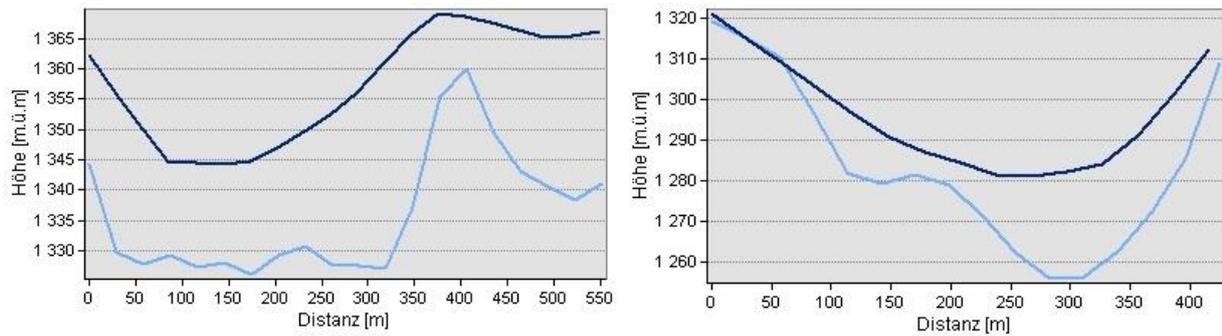


Abbildung 17: Abbildung der Topographie im unteren, flacheren Teil des Untersuchungsgebietes. Ersichtlich ist die Überschätzung der Höhe im SRTM DHM (dunkelblau) bzw. die Unterschätzung im ASTER GDEM (hellblau) sowie die weicherer Topographie im SRTM DHM.

### 5.3 Neigungsfehler

Für die Modellierung spielt die Neigung eine zentrale Rolle. Ein grosser Neigungsfehler zwischen den Höhenmodellen würden die Modellergebnisse schwerer vergleichbar und unsicherer machen. Es zeigte sich, dass vor allem im mittleren Teil wo das Gebiet insgesamt steiler ist, sehr grosse Neigungsfehler zwischen ASTER GDEM und SRTM DHM auftreten (Abb. 18). Im flacheren und offeneren oberen und unteren Teil sind die Neigungsfehler kleiner. Dies lässt sich durch die Aufnahmetechnik und- Geometrie der Daten begründen. Für die Modellierung bedeutet dies konkret grössere Unsicherheiten der Ergebnisse für den mittleren Teil.

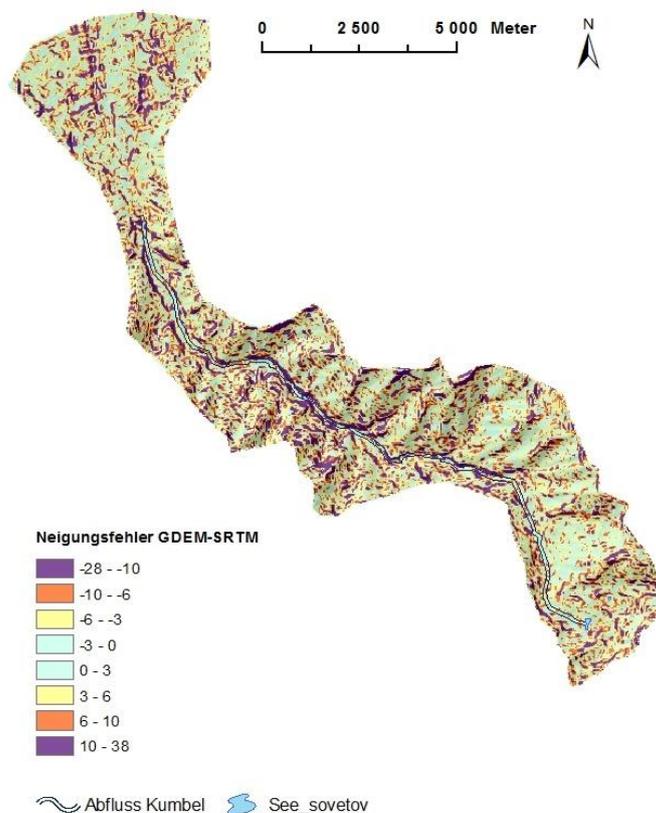


Abbildung 18: Grösse der Neigungsfehler [Grad] zwischen ASTER GDEM und SRTM DHM im Untersuchungsgebiet.

## 5.4 Artefakte

Wie zuvor schon erwähnt, weist vor allem das DHM aus dem GeoEye Datensatz grosse Artefakte auf. Dies aufgrund von durch Bewölkung und Wolkenschatten verursachten Datenlücken bzw. falsche Höhenwerte. In den beiden Höhenmodellen ASTER GDEM und SRTM DHM wurden keine massgebenden Artefakte festgestellt.

Die Aufnahmegeometrien für SRTM Daten und ASTER Daten ergeben spezifische Probleme für die korrekte Aufnahme der Topographie (erläutert im Kapitel 4), welche auch in diesem Fallbeispiel berücksichtigt werden müssen. Basierend auf den Arbeiten von (Hall et al. 2005, Frey und Paul 2012, Käab et al. 2005) können folgende Unsicherheiten benannt werden:

- Nordexponierte Gletscher weisen grössere Unsicherheiten zwischen Höhenmodellen aus SRTM und ASTER Daten auf (Radarschatten im SRTM, optischer Schatten im ASTER). Der Gletscher oberhalb des Sees im Untersuchungsgebiet ist Nordexponiert. Bei der Abschätzung von Eis- und Felsstürze als Trigger über die Modellierung müssen die Resultate daher kritisch betrachtet werden.
- SRTM unterschätzt allgemein steile Neigungen und die Höhe von Geländerücken und –kämmen. Die Tiefe von engen Tälern wird überschätzt. Dies bestätigen auch die berechnete Differenz des SRTM DHM und ASTER GDEM sowie die Profile (vgl. Abb. 17) im Untersuchungsgebiet. Die steile und enge Murgangrinne wird vom SRTM überschätzt.
- ASTER ist Sonnensynchron und daher können nordexponierte steile Hänge und Gletscher in mittlere Breiten problematisch sein.
- Kleine Gletscher in steilem und schattigem Gelände sind mehr anfällig für Artefakte bei ASTER und SRTM Daten. Der Gebirgsrücken oberhalb des Sees, welcher für potentielle Eislawinen untersucht wird, gehört in diese Kategorie.
- Steilhänge welche entgegen der Blickrichtung exponiert sind (z.B. für descending ASTER Aufnahmen) sind Nordhänge stark verzogen oder versteckt im backlooking Stereobild.
- Ungenügender optischer Kontrast.
- Raue Topographie mit Objekten, die zu klein sind, um in beiden Stereobildern gematcht zu werden.
- Datenlöcher im SRTM treten vermehrt bei Höhen zwischen 2500 und 4500 m.ü.m. und Hängen mit einer Neigung zwischen 20° und 65° und hoher Rauigkeit auf.

Für die spätere Modellierung von Eisabbrüchen wurden die hier erläuterten problematischen Zonen für das Untersuchungsgebiet, basierend auf den analysierten Scatterplots bezüglich Abhängigkeit der Höhendifferenzen zur Neigung und Exposition, extrahiert (Abb. 19)

Die kritische Neigung wurde zwischen 20° und 60° definiert. Die kritische Exposition zwischen 0°-50° und 160°-190° und 310°-360°. Es zeigte sich, dass die potentiellen Eisabbruchgebiete in den unsicheren Bereichen liegen.

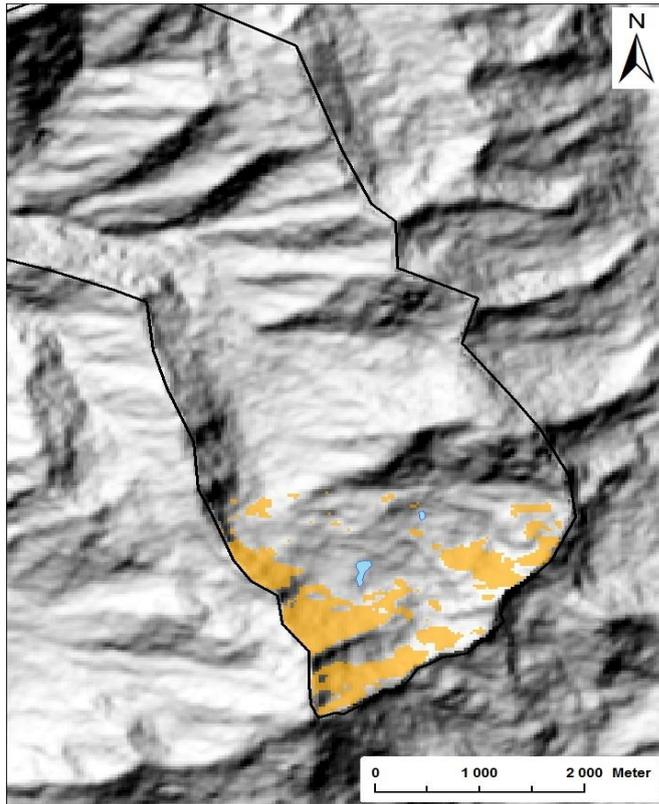


Abbildung 19: Kritische Gebiete für eine gute DHM Qualität.

## **6. Methoden**

### **6.1 Feldarbeit**

Um die qualitative Abschätzung der Ausbruchgefährdung und modellierte Reichweite eines Eisabbruches und eines Seeausbruches zu unterstützen (beschrieben in den nachfolgenden Unterkapiteln), wurden verschiedene Feldarbeiten geplant. Für die Evaluation, ob (eishaltiger) Permafrost in der Moräne vorhanden ist, wurde beabsichtigt, geoelektrische Messungen am Moränendamm durchzuführen, was der Hauptfokus in der Feldarbeit bildete. Für die Damngeometrie und wichtige Geländepunkte war das Ziel, GPS Punkte zu erheben und Distanz- und Neigungsmessungen durchzuführen. Weiter war das Ziel, das Gebiet geomorphologisch und hydrologisch aufzunehmen und auf mögliche wichtige Prozesse (z.B. Seespiegelschwankungen, Pipingprozesse) zu untersuchen. Aufgrund organisatorischer Schwierigkeiten konnten vor allem die wichtigen geoelektrischen Messungen nicht und die übrigen geplanten Feldarbeiten nur beschränkt durchgeführt werden. Schlussendlich konnten verschiedene GPS Punkte aufgenommen werden und das Gebiet um den See und auch den unteren Teil des Untersuchungsgebietes grob geomorphologisch, hydrologisch und auf Prozesse begutachtet und in die Risikoanalyse integriert werden.

### **6.2 Modellbasierte Abschätzung eines Eis-Felsabbruches als Triggermechanismus**

#### **6.2.1 Gebietsausscheidung**

Ob ein Eisabbruch potentiell als Trigger wirkt, ist abhängig davon, ob der See in der Falllinie und Reichweite des Eisabbruches liegt. Das Verhältnis von Seeachse zur Fallrichtung entscheidet dabei über die Anfälligkeit für einen Ausbruch (Huggel et al. 2004). Dies kann über die Modellierung evaluiert werden. Westoby et al. (2014) weist auf die Modellierung von potentiellen Wegen als die gängigste Methode zur Gefährdungsabschätzung hin. Eine genauere Abschätzung des Abbruchvolumens, Zeitpunktes und der Interaktion mit dem See ist aktuell noch problematisch und mit hohen Unsicherheiten verbunden (Westoby et al. 2014, Worni et al. 2014). Die Anwendung einer Bandbreite von initialen Bedingungen können zur besseren Beschreibung der Unsicherheiten und zu aussagekräftigeren Resultaten führen (Worni et al. 2014). Die Modellcharakteristiken der hier verwendeten Modelle sowie den Eisabbruchtyp im Untersuchungsgebiet führte zur Entscheidung, dass nur die Evaluation, ob Eisabbrüche potentiell den See erreichen, zu brauchbaren Aussagen führte. Somit kann die Aussage von Westoby et al. (2014) und Worni et al. (2014) die hier angewendete Methodik unterstützen.

Für die Evaluation unterscheidet Huggel et al. (2004) aufgrund unterschiedlicher Parameter für die Beurteilung der Abbruchgefährdung zwei Typen von Eisabbrüchen: Klifftyp und Rampentyp. Daher ist es wichtig, den Abbruchtyp im Untersuchungsgebiet zu definieren. Die steilen vereisten Hänge oberhalb des Sees im Untersuchungsgebiet zeigen Rampentyp-Charakteristik. Bei einem weiteren Rückzug des in den See Sovetov mündenden Gletschers, könnte sich direkt oberhalb des Sees auch ein Bereich mit Klifftyp-Charakteristik ausbilden. Die Möglichkeit einer Eislawine aus den Eishängen als Auslöser, wird in Anlehnung an das Evaluationsschema von Huggel et al. (2004) durchgeführt. Im Untersuchungsgebiet sind vor allem Eisabbrüche des Rampentyps möglich. Rampentyp-Eisabbrüche sind vor allem vom Temperaturregime des Eises und der Hangneigung des Gletscheruntergrundes

abhängig (Huggel et al. 2004). Somit wird das Gefährdungspotential über empirisch gewonnene Werte des kritischen Reibungswinkels und der durchschnittlichen Hangneigung der Gletscheroberfläche für die Reichweite beurteilt. Der kritische Reibungswinkel beschreibt die Hangneigung, ab der Eishänge instabil werden. Für kaltes Eis gilt ein genereller Wert von  $45^\circ$  und für temperiertes Eis einen Wert von  $25^\circ$  (Alean 1985 in Huggel et al. 2004). Falls der mittlere jährliche Temperaturwert bekannt ist, kann dieser zur Abschätzung des kritischen Reibungswinkel dienen (Abb. 20). Basierend auf diesen Angaben wird hier eine Kombination angewendet. Der mittlere jährliche Temperaturwert des Nachbartales auf ähnlicher Höhe ist vorhanden und wird hier in der Annahme gleicher Temperaturverhältnisse in das Untersuchungsgebiet übertragen. Da die Eishänge zwischen 100-200 Höhenmeter höher liegen, wird der verwendete mittlere jährliche Temperaturwert als worst-case Szenario und mögliches Zukunfts-Szenario betrachtet. Der über die mittlere jährliche Temperatur erhaltene Wert beträgt ungefähr  $28^\circ$ . Zusätzlich werden Abbruchstellen nach den generellen Werten von  $25^\circ$  bzw.  $45^\circ$  evaluiert. Da die Gletscher in dieser Region vermutlich entweder kalt oder polythermal sind (Bolch et al. 2011), wird der Wert von  $25^\circ$  hier als worst-case Szenario und als Szenario bei anhaltendem Klimawandel betrachtet. Eine erste grobe Abschätzung der möglichen Abbruchgebiete wird über Fotografien eruiert. Über die Neigungswerte und Hilfe der Konturlinien und Fließrichtungen im DHM in Kombination mit den fotografisch erhaltenen Abbruchgebieten werden potentielle Abbruchgebiete ausgeschieden (Abb. 21). Zu berücksichtigen ist, dass die potentiell gefährlichen Eishänge am unteren Rand am Übergang zum Gletscher und Moränenmaterial, eine abrupte Neigungsänderung aufweisen. Da dort abbrechende Eismassen wahrscheinlich kaum genügend Energie besitzen, um die eher flache Strecke bis zum See zu überwinden, wurden Abbruchgebiete aus den oberen potentiellen Zonen ausgewählt. Die Gebietsausscheidung für potentielle Felsabbrüche ist sehr schwierig und erfolgte hier ausschliesslich visuell über eigenes Bildmaterial. Eis-Felsabbrüche wurden dem Evaluationschema der Eisabbrüche gleichgesetzt.

#### 6.2.2 Modellierung mit MSF und RAMMS

Aus diesen Gebieten werden durch iteratives Vorgehen über das MSF und RAMMS Modell Abbrüche modelliert und so getestet, welche Zonen in der Falllinie des Sees liegen und den See erreichen. Für das MSF Modell braucht es einen Wert der maximalen Reichweite. Dafür wird der beschriebene Wert von  $17^\circ$  Pauschalgefälle in Huggel et al. (2004) angewendet. Es muss hier aber angemerkt sein, dass dieser Wert für die Gefährdungsabschätzung von Ereignissen in den Alpen erarbeitet wurde und für die Verhältnisse im Tien Shan abweichen kann. Für die Modellierung mit RAMMS sind geeignete Werte für die beiden Reibungskoeffizienten notwendig. Dafür werden Werte aus der Tabelle von Hungr und Evans (1996) in Stricker (2010) für Eis-Felsstürze benutzt (Abb. 22). Da die hier verwendete RAMMS Version für Murgänge konstruiert ist und an keinem Ereignis kalibriert werden kann, muss die Modellierung von Eislawinen und Felsstürzen unter Vorbehalt betrachtet und lediglich zur Evaluation der möglichen Fließwege benutzt werden. Eine Evaluation von RAMMS für die Anwendbarkeit für Eis-Felsstürze geben Schneider et al. (2010). Auf eine genauere Abschätzung des möglichen Eisabbruchvolumens oder Felssturzvolumens wird hier bewusst verzichtet. Die Modellierung wird mit dem SRTM DHM und dem ASTER GDEM mit einer Auflösung von 20 m sowie dem GeoEye DHM mit

einer Auflösung von 10 m und 20 m durchgeführt. Kleinere Eis- oder Felsabbrüche reagieren stärker auf kleinere Unebenheiten in der Topographie (Nötzli et al. 2006). Mit der höheren Auflösung des GeoEye DHM kann dieser Tatsache begegnet werden und die Ergebnisse mit dem ASTER GDEM und SRTM DHM unterstützen.

Die hier angewendete Methodik wird auch in Salzman et al. (2004) beschrieben und angewendet. In dieser Analyse wird nun auch der See unterhalb des Gorelnikgletschers getestet, mit dem Hintergrund, zu evaluieren, ob der See im Falle einer erneuten Volumenzunahme durch einen Eis-/Felssturz ausbruchsgefährdet sein könnte.

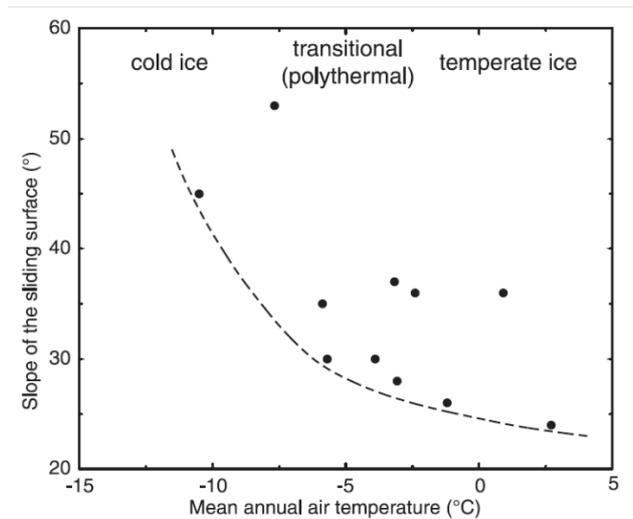


Abbildung 20: Beziehung zwischen mittlerer jährlicher Lufttemperatur und kritischem Reibungswinkel (Quelle: Huggel et al. 2004)

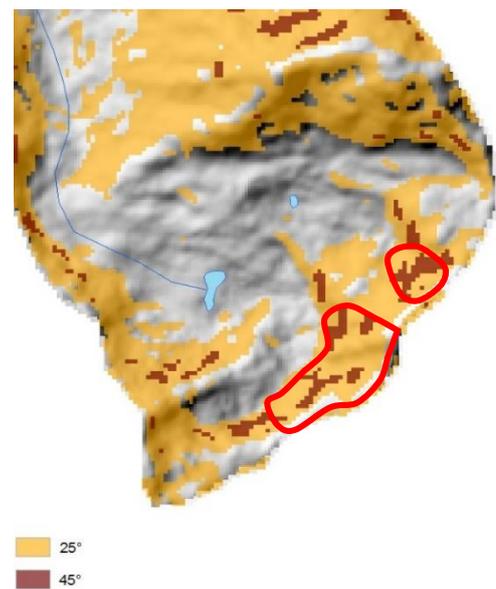


Abbildung 21: Potentielle Eisabbruchgebiete beim See Sovetov und Gorelniksee (rote Markierung) bei einer kritischen Neigung von 25° und 45°.

### 6.2.3 Abbruchszzenarien für Eis- und Felsabbrüche

Beim Gorelniksee werden 3 Abbruchzonen und beim See Sovetov 6 Abbruchzonen mit allen drei Höhenmodellen getestet. Beim MSF mit dem kritischen Neigungswinkel von 17°. Die Koeffizientenwertepaare bei RAMMS werden im Sinne von maximaler und minimaler Wertekombination gewählt um eine maximale und minimale Auslaufdistanz zu erhalten. Dadurch kann ein Toleranzbereich für die Reichweite abgeleitet werden. Die Wertepaare sind:

| $\mu$ [-] | $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ] |
|-----------|---------------------------|
| 0.03      | 1000                      |
| 0.1       | 1000                      |

Typical ranges of values for the rheological parameters adopted in the literature for the frictional and Voellmy rheologies (from Hungr and Evans, 1996; Ayotte and Hungr, 2000; Chen and Lee, 2003; Pirulli et al., 2004; McDougall, 2006; Crosta et al., 2006b)

|                             | Internal rheology        | Frictional rheology           | Voellmy rheology              |                              |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|                             | Friction angle, $\phi_i$ | Bulk friction angle, $\phi_b$ | Frictional coefficient, $\mu$ | Turbulent coefficient, $\xi$ |
|                             | [°]                      | [°]                           | [-]                           | [ms <sup>-2</sup> ]          |
| Rock avalanches             | 35–40                    | 10–30                         | 0.1–0.25                      | 450–1000                     |
| Debris avalanches           | 35                       | 23–30                         | 0.07–0.1                      | 200–250                      |
| Rockslide-debris avalanches | 35                       | 8–31                          | 0.05–0.2                      | 200–400                      |
| Ice-rock avalanches         | 20–35                    | 10–20                         | 0.03–0.1                      | 1000                         |
| Debris flows                | 35                       | 22–29                         | 0.05–0.2                      | 200–500                      |
| Volcanic-rock avalanches    | 30–35                    | 9–13                          | 0.05–0.1                      | 100–140                      |

Abbildung 22: Werte für die Reibungskoeffizienten bei Eis-Felsstürze nach Hungr und Evans 1996. (Quelle: Stricker 2010)

### 6.3 Qualitative Abschätzung der Ausbruchgefährdung

#### 6.3.1 Triggermechanismen

Wie Huggel et al. (2004) zusammenfassend beschreiben, ist die Ausbruchswahrscheinlichkeit oder -Gefährdung eine Funktion von der grundsätzlichen Anfälligkeit des Dammes zum Kollaps und dem Potential von externen Triggerprozessen. Clague und Evans (2000) unterscheiden sechs Triggermechanismen für Gletscherseeausbrüche:

- Overtopping durch Eislawinen oder Hangrutschungen
- Überlauf durch plötzlich erheblichen Schmelzwassereintrag (Jökulhlaup) oder Ausbruch eines oberhalb liegenden Sees
- Überlauf durch intensive Niederschläge oder Schneeschmelze
- Erdbeben
- Piping
- Schmelzen von Eis in der Moräne

Dabei sind letztere zwei als interne Triggermechanismen einzuordnen, während die ersten drei als externe Triggermechanismen gelten. Das Erdbeben kann sowohl als interner wie auch als externer Trigger wirken (Kääb et al. 2005, Westoby et al. 2014). Intern durch erschütterungsbedingte Subsidenz- und Erosionsprozesse, extern durch erschütterungsbedingte Eis- oder Felsabbrüche, die ihrerseits einen Seeausbruch auslösen.

Die Ausbruchgefährdung über einen internen Triggermechanismus ist in erster Linie von der Moränenstruktur, -geometrie und vom Moränenaufbau abhängig, sowie ob Eis in der Moräne vorhanden ist. Gefährdungsmindernde oder -verstärkende Faktoren sind die Art der Wasserdrainage, die Seentwicklung und die distale Hangneigung des Moränendamms. (Mergili und Schneider 2011, Worni et al. 2014) Unter Piping wird der Wassertransport durch das innere der Moräne verstanden. Dieser Prozess kann entstehen, wenn der hydraulische Gradient zwischen Seespiegel und distalem unterem Ende des Moränendamms genügend gross ist. Das Piping führt zum stetigen Austrag von

Feinsediment aus der Moräne und dadurch zu Setzungs- und Erosionsprozessen. Diese wirken destabilisierend auf den Moränendamm, so dass externe Trigger kleinere Magnituden für eine Ausbruchsinitiierung aufweisen können. Moränendämme, welche Wasser über Pipingprozesse drainieren, sind für einen Dambruch mehr gefährdet als Moränendämme, welche einen Oberflächenabfluss aufweisen. Eis in der Moräne wirkt stabilisierend auf den Moränendamm. Beim derzeitigen und vor allem projizierten zukünftigen Klimawandel kann dieses aber schmelzen. Das fehlende, als Kittmittel wirkende Eis, führt zu Subsidenzprozessen im Moränendamm und erhöhter Erosionsanfälligkeit. Subsidenzprozesse führen auch hier dazu, dass die für einen Ausbruch nötige Magnitude und Amplitude des Ausbruchsmechanismus kleiner wird. Der Damm mit Lockermaterial ohne Eis weist eine geringere Stabilität auf und erhöht die Ausbruchsgefährdung des Sees.

Die Ausbruchsgefahr über einen externen Triggermechanismus ist vor allem von der Topographie und ihrer Anfälligkeit für Massenbewegungen über die Hangneigung abhängig. Im Kontext der globalen Klimaveränderung wurde eine Erhöhung der Hanginstabilität und Anfälligkeit für Massenbewegungen aufgrund des schwindenden Permafrostes und Rückzug der Gletscher beobachtet (Nötzli et al. 2006, Worni et al. 2014). Erweiternde Faktoren sind die Möglichkeit von seismischem Triggering sowie das Freeboard, Dammstruktur und Kalbungsprozesse in den See. Das Überlaufen des Dammes durch externe Mechanismen führt zu verstärkter rückschreitender Erosion des Moränenmaterials. Diese rückschreitende Erosion wirkt oft selbstverstärkend, da der Abfluss bei fortschreitender Erosion steigt, was zu weiterer stärkerer Erosion führt (runaway-Effekt) und bis zum Bruch des Dammes führen kann. (Clague und Evans 2000, Mergili und Schneider 2011, Westoby et al. 2014, Worni et al. 2014)

Westoby et al. (2014) und Worni et al. (2014) geben einen guten Überblick über die Faktoren und Mechanismen für einen Seeausbruch und zeigen auch die Herausforderungen und Schwierigkeiten beim Verständnis solcher Prozesse und dass die Erfassung vieler wichtiger Faktoren oft nicht im befriedigendem Masse möglich ist. Schlüsselindikatoren sind daher ein erster wichtiger Schritt für ein Abschätzungsschema für die Ausbruchsgefährdung. Für die Abschätzung der Ausbruchsgefährdung durch interne oder externe Trigger wird hier daher eine qualitative Beurteilungsmethode nach Huggel et al. (2004) und Wang et al. (2012a) angewendet, indem verschiedenen Indikatoren bewertet werden (Tab. 7).

### 6.3.2 Verwendete Schlüsselkomponenten und Auswertungsschema

Folgende Schlüsselkomponenten und Indikatoren werden dafür verwendet:

Table 7: Auswertungsschema für die qualitative Abschätzung der Ausbruchgefährdung der Seen Sovetov und Gorelnik.

| Schlüsselkomponente               | Indikator   | Klassierung   | Ausbruchgefährdung          | Wert |
|-----------------------------------|---|---|-----------------------------|------|
| <b>Dammtyp</b>                    | Eis<br>Moräne<br>Fels                                     |   | hoch<br>mittel-hoch<br>tief |      |
| <b>Eisabbruch</b>                 | Gletscherneigung  | gross / mittel / tief   | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Temperaturregime<br>Gletscher                             | temperiert/polythermal/kalt   | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Entwicklung von<br>Eisspalten                             | Eisspalten und Eisfall<br>vorhanden / Eisspalten<br>vorhanden / keine<br>Eisspalten       | hoch/mittel/tief            |      |
| <b>Überlauf</b>                   | Freeboard   | <5m / 5-15m / >15m  | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe                       | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            |      |
| <b>Piping</b>                     | Eisvorkommen im<br>Damm                                   | ja / möglich / nein   | hoch/mittel/mittel-<br>tief |      |
|                                   | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe                   | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe                       | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            |      |
| <b>Gletscherbewegung</b>          | Distanz Gletscher zu<br>See                               | 0 / 0-500 / >500  | hoch/mittel/tief            |      |
| <b>Dammstabilität</b>             | Eisvorkommen im<br>Damm                                   | ja / nein   | hoch/mittel-tief            |      |
|                                   | Distale Hangneigung<br>des Dammes                         | >20° / 3-20° / <3°  | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe                   | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            |      |
|                                   | Dammmaterial  | konsolidiert / unkonsolidiert   | tief / mittel               |      |
| <b>Meteorologische<br/>Events</b> | Häufigkeit hohe<br>Temperaturen und<br>Starkniederschläge | häufig<br>sporadisch<br>selten  | hoch<br>mittel<br>tief      |      |
| <b>Seismische<br/>Aktivitäten</b> | Erdbebenanfälligkeit<br>der Region                        | häufig / grosse Stärke<br>sporadisch / mittlere Stärke<br>selten / tiefe Stärke           | hoch<br>mittel<br>tief      |      |
| <b>Seeimpakt</b>                  | Eislawine/Eisabbruch/<br>Felssturz/Murgang                | Häufig / grosses Volumen<br>sporadisch / mittleres<br>Volumen<br>selten / kleines Volumen | hoch<br>mittel<br>tief      |      |

Tabelle 8: Bewertungsschlüssel für die qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung der Seen Sovetov und Gorelnik.

|       | Tief  |       | Mittel |    |       | hoch  |       |
|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|
| Wert  | 1     |       | 2      |    |       | 3     |       |
| Summe | 17-23 | 23-29 | 29-33  | 34 | 35-40 | 40-45 | 45-51 |

Für jeden Parameter wird die Ausbruchsgefahr qualitativ mit tief, mittel und hoch bewertet. Den einzelnen Indikatoren werden die Werte 1-3 je nach Resultat der Analyse zugewiesen. Wegen zu starker Subjektivität wird hier jedem Indikator die gleiche Gewichtung zugeschrieben. Durch die Aufsummierung der zugewiesenen Werte aller Indikatoren kann die Gefährdung abgeschätzt werden. Tabelle 8 gibt einen Überblick über den Bewertungsschlüssel. Der minimale Summenwert der möglich ist, ist 17 und entspricht einer geringen Ausbruchsgefährdung. Wenn alle Indikatoren für eine mittlere Ausbruchsgefahr bewertet werden, ergibt sich ein Wert von 34. Der maximal erreichbare Wert ist 51 und entspricht hoher Ausbruchsgefährdung. Dazwischenliegende Werte werden in Übergangsbereiche klassiert. Diese wurden so klassiert, dass eine gleiche Gewichtung der Klassenbreite Tief, Mittel und Hoch möglich war und dass der prozentuale Punktwertanteil durch seine Gewichtung die Summe die Subklassenzuteilung beeinflusst (z.B. 25% Wert 3 und 75% Wert 2 ergäbe die Subklasse 35-40, 75% Werte und 25% Werte ergäbe die Subklasse 45-51)

#### 6.4 Abschätzung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches

Für die Bestimmung der maximalen Reichweite bestehen verschiedenen Ansätze. In dieser Arbeit wird ein modellbasierter Ansatz angewendet. Als Vergleich wird ein empirisch-statistischer Ansatz miteinbezogen.

Für die modellbasierte Abschätzung der Reichweite werden die beiden Modelle MSF von Huggel et al. (2003) und das an der WSL (SLF) entwickelte Modell RAMMS verwendet. Beide weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Ziel ist, neben der Fragestellung der Modellierung der Reichweite eines Ausbruches auch der Vergleich und die Abschätzung der Potentiale der Modelle für die gegebene Fragestellung. Die Stärke des MSF Modells liegt bei der geringeren Anzahl Eingangsdaten. Dies erlaubt bei geringer Datenverfügbarkeit eine erste grobe Abschätzung. RAMMS hingegen benötigt mehr Eingangsdaten, erlaubt jedoch die Startbedingungen (Ausbruchsvolumen und Abfluss) besser zu kontrollieren als mit MSF. Ausserdem ist es möglich, über die implementierten Reibungsparameter die Charakteristik des Ausbruches (z.B. Murgang vs. hyperkonzentrierte Flut) besser zu beschreiben. Das Erhalten von aussagekräftigen Resultaten erfordert jedoch bei physikalisch basierten Modellen wie RAMMS eine sorgfältige Kalibrierung anhand von früheren Ereignissen. Vereinzelt sind Ereignisdokumentationen wie in Yegorov (2007) und in Lentschke (2012) vorhanden. Jedoch kommt es teilweise zu sehr unterschiedlichen Werteangaben, was neben der geringen Datenverfügbarkeit eine zusätzliche Schwierigkeit für die Kalibration darstellt. Der Schwachpunkt bei der empirischen Abschätzung liegt bei der Gültigkeitseinschränkung der Beziehung auf das Evaluationsgebiet. Die Stärke liegt in der schnellen und mit wenigen Eingangsdaten erreichbaren Abschätzung. Neben der Unterstützung der Modellierung kann hier gerade die Anwendbarkeit der benutzten Beziehung auf das Untersuchungsgebiet getestet werden.

#### 6.4.1 Empirisch-Statistisch Abschätzung

Empirisch-statistisch wird die Neigungsbeziehung nach Huggel et al. (2003) und Rickenmann (2005) sowie eine Volumenbeziehung nach Rickenmann (1999) für die Abschätzung der Reichweite angewendet.

$$\text{Pauschalgefälle} = \arctan(\text{Höhendifferenz}/\text{Horizontaldistanz}) \quad (6.1)$$

$$\text{Reichweite } L = 1.9 * \text{Volumen}^{0.16} * \text{Höhendifferenz}^{0.83} \quad (6.2)$$

Hegglin und Huggel (2008) und Rickenmann und Zimmermann (1993) (in Rickenmann 2005) empfehlen einen Neigungswert von minimal 11° für granulare Murgänge, tiefere Werte bis maximal 2°-3° für Murgänge mit höherem Wassergehalt und feinerem Sediment. Die Murgänge mit glazialer Genese im Untersuchungsgebiet werden in der Literatur als granulare Murgänge beschrieben. Über den Vergleich des notwendigen Pauschalgefälles für die Reichweite vom Ereignis 1977 und 2006 mit den Empfehlungswerten, kann die Anwendbarkeit im Untersuchungsgebiet getestet werden. Für die Beurteilung der Anwendbarkeit der Formel von Rickenmann (1999) wird ähnlich vorgegangen, indem das berechnete Resultat für das Ereignis 1977 und 2006 mit der tatsächlichen Reichweite verglichen wird.

#### 6.4.2 Modellbasierte Abschätzung mit MSF

Wie zuvor beschrieben empfehlen Hegglin und Huggel (2008) und Rickenmann und Zimmermann (1993) (in Rickenmann 2005) Neigungswerte zwischen 11° und 2° je nach Charakteristik des Murganges. Damit kann mit dem MSF Modell die Reichweite in Abhängigkeit der Murgangcharakteristik angenähert werden. Dieser Wertebereich soll denn auch hier als Testbereich dienen. Die beschriebenen Murgänge im Untersuchungsgebiet und die eigenen Feldbeobachtungen der Akkumulationsgebiete zeigen einen Transport von viel Grobmaterial auf und somit eher die Charakteristik von granularen Murgängen. Dies würde vorab auf eher höhere kritische Neigungswerte deuten.

Für die Modellierung mit dem MSF Modell wird in zwei Schritten vorgegangen. Mit dem MSF Modell wird zuerst das Ereignis 1977 simuliert (Beschrieb zum Ereignis im Kapitel 6.4.4.2), womit die Neigungswerte für die beobachtete Reichweite erhalten werden. Eine Simulation ab dem ehemaligen See wird einer Simulation mit der Berücksichtigung der unterschiedlichen Teilstrecken, wie sich das Ereignis abgespielt hat, gegenübergestellt. Damit kann die Sensitivität auf die Wahl des Ausbruchsortes evaluiert werden. Parallel wird eine Simulation des Ereignisses 1977 mit vordefinierten Neigungswerten für eher granulare Murgänge von 11° und 8° durchgeführt. Damit kann eine erste Einschätzung gemacht werden, ob die reale Reichweite bei bestimmter Murgangcharakteristik mit den Empfehlungswerten übereinstimmen. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen mit dem Vergleich zu den Empfehlungswerten, werden Szenarien mit verschiedenen Neigungskriterien für die aktuelle und zukünftige Situation beim See Sovetov erstellt und modelliert. Die Modellierung für die aktuelle Seegeometrie und für die potentiell zukünftige Seegeometrie dient dazu, die Sensitivität der Modellergebnisse auf die Wahl der Anrissgrösse zu bestimmen. Auf eine Modellierung eines Ausbruches des Gorelniksees wird hier, aufgrund seiner Lage neben dem See Sovetov und seiner aktuell tiefen Ausbruchsgefährdung, bewusst verzichtet.

Die geeigneten kritischen Neigungswerte aus der Simulation vom Ereignis 1977 geben Hinweise für die Charakteristik des Murganges und werden somit zusätzlich als wertvolle Anhaltspunkte für die Startwerte für den coulomb Reibungskoeffizient bei der Modellierung mit RAMMS weiterverwendet. Die Simulation und die nachfolgende Modellierung wird mit den Höhenmodellen ASTER GDEM und SRTM DHM mit einer Auflösung von 30 Metern durchgeführt. Zur Analyse der Sensitivität der Ergebnisse auf die Auflösung der Höhenmodelle werden in der Simulationsphase auch testweise Modellläufe mit dem SRTM DHM in einer Auflösung von 90 Metern durchgeführt.

#### 6.4.3 Ausbruchsszenarien für die MSF Modellierung

Basierend auf den Angaben von Huggel et al. (2004) und Rickenmann und Zimmermann (1993) (in Rickenmann 2005) und den Simulationsergebnissen (Kapitel 7.2) wird ein Murgang mit den kritischen Neigungswerten 11°, 8° und 6° modelliert (Tab. 9). Dies ab dem aktuellen und zukünftigen See. Auf die Modellierung ab der Murgangrinne wird hier verzichtet, da dieses Resultat sich gegenüber dem Resultat aus der Simulationsphase nicht verändern würde. Die Modellierung wird mit dem ASTER GDEM und dem SRTM DHM durchgeführt bei einer Auflösung von 30 Meter.

*Tabelle 9: Gewählte kritische Neigungswerte für die Ausbruchmodellierung mit dem MSF Modell.*

|                   | See aktuell | See zukünftig |
|-------------------|-------------|---------------|
| Kritische Neigung | 11°         | 11°           |
| Kritische Neigung | 8°          | 8°            |
| Kritische Neigung | 6°          | 6°            |

#### 6.4.4 Modellbasierte Abschätzung mit RAMMS

Für die Modellierung mit RAMMS wird in drei Schritten vorgegangen. Für eine erfolgreiche Modellierung muss die Charakteristik eines GLOF im Untersuchungsgebiet abgeschätzt werden. Dieser Schritt wird unter dem Kapitel Parametrisierung (6.4.4.1) vorgenommen. Mit den Ergebnissen aus der Parametrisierung wird anschliessend die Kalibration des Modelles durchgeführt, um die Modellparameter auf das Untersuchungsgebiet und die Charakteristik des GLOF abzustimmen. Dieser Schritt wird ausführlicher im Kapitel Kalibrierung (6.4.4.2) behandelt. Basierend auf den Kalibrationsergebnissen, werden Szenarien für die eigentliche Modellierung einer GLOF für die aktuelle und potentiell zukünftige Situation definiert und modelliert. Dieser Schritt wird im Kapitel Szenarienbildung (6.4.5) beschrieben. Für die Kalibration wurden die Ereignisse 1977 und 2006 benutzt. Die Kalibration wird mit dem ASTER GDEM durchgeführt und stichprobenartig mit dem SRTM DHM getestet. Die Modellierung wird mit den Höhenmodellen ASTER GDEM und SRTM DHM sowie im oberen Teil zusätzlich mit dem GeoEye DHM durchgeführt. Aufgrund einer ersten Vormodellierung für die Abschätzung des Einflusses der Höhenmodellauflösung und des generische Typs des Höhenmodells auf die Modellierungsergebnisse (z.B. Stolz und Huggel 2008), wird die Kalibration und Modellierung bei einer Auflösung von 20 m durchgeführt. Testweise wird im oberen Teil auch eine Modellierung mit dem GeoEye DHM mit einer Auflösung von 10 Metern durchgeführt, um die Modellergebnisse in der feinstrukturierten Topographie besser zu beurteilen.

#### 6.4.4.1 Parametrisierung

Wichtige Variablen für die Charakteristik einer GLOF sind:

- Ausbruchsmechanismus
- Ausbruchsvolumen
- Murenfracht
- Maximaler Abfluss
- Maximale Auslaufdistanz
- Abflusstiefe
- Abflussgeschwindigkeit
- Fliesstransformationen
- Anzahl Murenschübe

##### Ausbruchsmechanismus

Die Charakteristik eines Ausbruches kann je nach Trigger unterschiedlich sein. Trigger wie die rückschreitende Erosion, durch die der See mit stetig steigendem Abfluss entleert, kann besser mit einer Durchflusskurve beschrieben werden. Massenbewegungen in den See können einen schwallartigen Wasserausfluss verursachen und ein schnelleres Brechen des Dammes. Diese Charakteristik könnte für ein worst-case Szenario durchaus mit einem Blockweise-definierten Ausbruch beschrieben werden. Da in der Region des Untersuchungsgebietes mehrheitlich Ausbrüche mit Durchflusskurven-Charakteristik beobachtet wurden, und unterhalb des untersuchten Sees ein tiefer Abflusskanal liegt, wird die Modellierung mit einer Durchflusskurve vorgenommen. Für weiterführende Abschätzungen könnten diesen Modellergebnissen Modellläufe mit Blockweisem Ausbruch gegenübergestellt werden.

##### Ausbruchsvolumen und Murenfracht

Das worst-case Szenario ist die völlige Entleerung des Sees. Dies ist eine plausible Annahme, da in der Literatur beschriebene Moränenseeausbrüche häufig vollständig entleerten und auch Ereignisse in der Region des Untersuchungsgebietes diese Charakteristik aufwiesen. Für den hier untersuchten See sind bathymetrische Daten vorhanden (Kapitel 4.2), aufgrund derer das aktuelle Volumen des Sees bekannt ist. Für das potentiell zukünftige Volumen, werden die GlabTop-Modellierungsergebnisse (Daten T.Bolch) benutzt. Über die daraus extrahierte Fläche des potentiell möglichen Sees wird über empirisch-statistische Beziehungen das Volumen berechnet. Da die Beziehungen gebietsspezifisch sind und ihre Gültigkeit in anderen Regionen verlieren können (Yao 2012), werden verschiedene Beziehungen (Formeln 6.3-6.6) benutzt und durch die Berechnung der Abweichung zum Mittel die Unsicherheiten ausgedrückt (Tab. 10). Für die Modellierung wurde schlussendlich das Mittel verwendet. Eine Kontrollrechnung der angewendeten Formeln auf die aktuellen Verhältnisse ergaben eine Abweichung von -13% bis + 34%. Für ein worst-case Szenario ist eine Überschätzung eher besser und somit ergab die Formel (6.3) nach Huggel et al. (2002) und (6.6) nach Wang et al. (2013) das beste Resultat mit +24% bzw. +26% Abweichung. Bolch et al. (2011) erhalten mit der Formel (6.3) eine ähnliche Abweichung mit bis +20%.

Da die Transformation zu einem Murgang und verschiedene Prozesse entlang der Murgangstrecke mit zum Teil grosser Volumenzunahme verbunden ist (Huggel et al. 2004) und die beobachteten Start- und Endvolumina eine hohe Differenz aufweisen, wird das Ausbruchsvolumen über empirisch-statistische Beziehungen skaliert und in die Modellierung integriert. Huggel et al. (2004) gibt an, dass Murgänge zwischen 50%-80% Sediment beinhalten. Dies entspricht, auch in Bezug, dass zusätzliches Wasser aus Nebenflüssen oder Hangwasser das Volumen vergrössern kann, einer grob gerundeten Skalierung des Seevolumens um das 2 bis 3 fache. Studienergebnisse von Rickenmann (2003) und Mergili et al. (2011) im Tien Shan und Pamirgebirge zeigten eine Skalierung des Ausbruchsvolumens um das 2-6 fache. Es soll hier vorweggenommen werden, dass eine erste Kalibrierung unter der Annahme einer 2-3 fachen Skalierung eher zu einer Unterschätzung der Reichweite in RAMMS führte. Eine weitere Kalibration, basierend auf den Studienergebnissen von Rickenmann (2003) und Mergili et al. (2011) zeigte mehr Erfolg. Die hier angewendete Skalierung basiert auf den Angaben von Rickenmann (2003), Huggel et al. (2004) und Mergili et al. (2011) und beträgt das 3- und 6-fache des Seevolumens.

Speziell bei der untersuchten Situation ist, dass der obere Teil des Untersuchungsgebietes eher flach ist und sich ein erster Murgang möglicherweise dort bereits ablagert, das Wasser weiter in die Murgangrinne fliesst und erneut einen Murgang auslöst. Dies wird hier in dem Sinne berücksichtigt, dass die Ausbruchmodellierung auf zwei Teilstrecken getrennt durchgeführt wird. Es wird die Annahme gemacht, dass der Murgang, welcher die Siedlungsgebiete gefährden könnte, in der Murgangrinne entsteht und dass der im oberen Teil gebildete Murgang sich dort bereits wieder ablagert. Dadurch wird das skalierte Ausbruchsvolumen ab der Murgangrinne modelliert und das wahre Seevolumen ab dem See modelliert. Die Benutzung des „wahren“ Seevolumens im oberen Teil wird hier auch als sinnvoll betrachtet, da die Topographie im oberen Teil kompliziert ist und ein skaliertes Volumen die Dynamik direkt unterhalb des Sees stark verfälschen könnte. Dies auch, weil das Volumen direkt unterhalb des Sees in Realität nicht das skalierte Volumen aufweisen kann. Dieser aufgeteilten Modellierung, werden Testweise 4 Modellläufe mit skaliertem Volumen direkt ab dem See gegenübergestellt, um die Unsicherheiten durch die Wahl des Ausbruchortes zu beurteilen.

$$V = 0.104 \cdot A^{1.42} \quad (6.3) \quad \text{Huggel et al. 2002}$$

$$V = 3.114 \cdot A + 0.0001685 \cdot A \quad (6.4) \quad \text{O'Connor et al. 2001*}$$

$$V = 0.059 \cdot A^{1.44} \quad (6.5) \quad \text{Popov 1991}$$

$$V = 0.096 \cdot A^{1.426} \quad (6.6) \quad \text{Wang et al. 2013}$$

\*in McKillop und Clague 2007

*Tabelle 10: Berechnete zukünftige Volumina für den See Sovetov über empirisch-statistische Beziehungen und deren Abweichung zum Mittel als Mass der Unsicherheit.*

| Formel | Volumen See Sovetov | Abweichung zum Mittel |
|--------|---------------------|-----------------------|
| 6.3    | 1'408904            | -7%                   |
| 6.4    | 2'196247            | 45%                   |
| 6.5    | 1'007276            | -33%                  |
| 6.6    | 1'437533            | -5%                   |
| Mittel | 1'512490            |                       |

Folgende Ausbruchsvolumina wurden bestimmt:

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| See 1977:                        | 75'000 m <sup>3</sup>                                 |
| See aktuell:                     | 246'500 m <sup>3</sup>                                |
| See zukünftig:                   | 1'512'490 m <sup>3</sup>                              |
| Murgangrinne 1977 skaliert:      | 225'000 m <sup>3</sup> und 450'000 m <sup>3</sup>     |
| Murgangrinne aktuell skaliert:   | 750'000 m <sup>3</sup> und 1'500'000 m <sup>3</sup>   |
| Murgangrinne zukünftig skaliert: | 4'500'000 m <sup>3</sup> und 9'000'000 m <sup>3</sup> |

#### Maximaler Abfluss

Der maximale Abfluss ist eine der wichtigsten Grössen für die Modellierung. Auch hier muss zwischen dem maximalen Abfluss des Sees und des Murganges ab der Murgangrinne differenziert werden.

Der maximale Abfluss bei einem Seeausbruch ist nach Costa und Schuster (1988) und Clague und Evans (1994) (in Clague und Evans 2000) von folgenden Faktoren abhängig:

- Wasservolumen das ausfliesst
- Geometrie des Moränendamms
- Moränenstruktur und –textur
- Seehypsometrie
- Topographie talabwärts
- Ausbruchmechanismus
- Sedimentverfügbarkeit talabwärts

Für eine grobe Abschätzung wurde von verschiedenen Seiten versucht, eine empirische Beziehung zwischen Wasservolumen, das drainiert, und maximalem Abfluss aus vergangenen Ereignissen abzuleiten. Dies, weil die anderen Faktoren oft schwierig miteinzubeziehen sind, da nicht immer eine genaue Evaluation dieser Faktoren möglich ist. Aufgrund der regionalen Unterschiede in der Charakteristik entstanden verschiedene Formeln. Diese Gebietsabhängigkeit führt dazu, dass sich der Gültigkeitsbereich grundsätzlich auf das Gebiet, auf das die Datengrundlage für die Beziehung basiert, beschränkt (Yao 2012). Ausserhalb muss mit Abweichungen und grösseren Unsicherheiten gerechnet werden. Weitere Unsicherheiten ergeben sich dadurch, dass die Datengrundlage zu Seeausbrüchen klein ist, weil solche Ereignisse nicht häufig vorkommen. Weil in der Region des Untersuchungsgebietes Werte für maximale Abflüsse für einen Seeausbruch kaum vorhanden sind, wurden die maximalen Abflüsse über empirisch-statistische Beziehungen bestimmt. Die berechneten Abflusswerte können eine hohe Bandbreite aufweisen durch die Nutzung unterschiedlicher Beziehungen (z.B. Wang et al. 2008). Darum wird der maximale Abfluss über mehrere Formeln (6.7-6.13) berechnet und die Abweichung zum Mittelwert als Angabe der Unsicherheit benutzt (Tab. 11). Die Werte können grob am in der Literatur angegebenen Abflusswert für das Ereignis 1977 auf ihre Anwendbarkeit kontrolliert werden. In die Modellierung wurde schlussendlich der Mittelwert integriert.

Der maximale Abfluss für Murgänge durch Gletscherseeausbrüche ist eine sehr unsichere Variable, wie die Literatur der Region (Yegorov 2007, Blagovechshenskiy und Yegorov 2009, Narama et al. 2009) zeigt. Ausserdem ist die Datengrundlage für Murgänge durch Seeausbrüche um ein vielfaches kleiner

als für normale Murgänge. Die Bestimmung des Murgangabflusses erfolgt deshalb in Kombination der statistischen Q-V-Beziehung nach Stricker (2010) und den Erfahrungswerten aus der Region.

- $Q_{max} = 0.0048 * V^{0.896}$  (6.7) Popov 1991\*  
 $Q_{max} = 0.72 * V^{0.53}$  (6.8) Evans 1986\*  
 $Q_{max} = 0.045 * V^{0.66}$  (6.9) Walder und O'Connor 1997\*  
 $Q_{max} = 0.00077 * V^{1.017}$  (6.10) Huggel et al. 2002  
 $Q_{max} = 2V/t$  (6.11) Huggel et al. 2002  
 $Q_{max} = 0.00013 * P_E^{0.6}$  (6.12) Costa und Schuster 1988  
 $Q_{max} = 0.063 * P_E^{0.42}$  (6.13) Clague und Evans 2000

\*in Wang et al. 2008

( $P_E = V_{see}$  \*spezifisches Gewicht Wasser \* Dammhöhe; mit spezifischem Wassergewicht 9800 N/m<sup>3</sup>)

Folgende Werte wurden für den maximalen Abfluss [m<sup>3</sup>/s] für den Seeausbruch berechnet:

*Tabelle 11: Berechnete maximale Abflüsse [m<sup>3</sup>/s] für das Kalibrationsereignis 1977 sowie für die aktuelle und zukünftige Situation beim See Sovetov. Zusätzlich wurde die Abweichung zum Mittel als Maß der Unsicherheit berechnet.*

| Formel                                  | 1977<br>(90'000 m <sup>3</sup> ) | Abweichung | Aktuell<br>(246'500) | Abweichung | Zukünftig<br>(1'512490) | Abweichung |
|---|----------------------------------|------------|----------------------|------------|-------------------------|------------|
| 6.7                                     | 131                              | 53%/-14%   | 325                  | -39%/-3.3% | 1653                    | -8%/12%    |
| 6.8                                     | 304                              | 8%/98%     | 519                  | -2.6%/54%  | 1357                    | -23%/-7%   |
| 6.9                                     | 84                               | -70%/-45%  | 163                  | -69%/-51%  | 539                     | -70%/-64%  |
| 6.10                                    | 84                               | -70%/-45%  | 234                  | -56%/-30%  | 1483                    | -17%/0%    |
| 6.11                                    | 180                              | 35%/18%    | 493                  | -7.5%/47%  | 3025                    | 69%/104%   |
| 6.12                                    | 135                              | -51%/-12%  | 281                  | -47%/-16%  | 836                     | -53%/-44%  |
| 6.13                                    | 1022                             | 269%/568%  | 1714                 | 222%/410%  | 3674                    | 105%/148%  |
| Mittel                                  | 277                              |            | 533                  |            | 1795                    |            |
| Mittel ohne<br>Clague und<br>Evans 2000 | 153                              |            | 336                  |            | 1482                    |            |

Die Kontrolle der Anwendbarkeit der Formeln ergab, dass die Formeln (6.9) und (6.10) für die absoluten Werte die besten Resultate liefern für 1977. Relativ gesehen sticht die Beziehung von Clague und Evans (6.13) mit starken Abweichungen hervor. Die Formel von Popov (1991) (in Huggel et al. 2002) basiert zwar auf Daten im nördlichen Tien Shan ergibt aber nicht zwingend bessere Ergebnisse. Wang et al. (2008) kommen beim Vergleich verschiedener Beziehungen auf ähnlich hohe Abweichungen wie hier. Ein Vergleich mit Narama et al. (2009) zeigt, dass die berechneten mittleren Abflüsse beim Seeausbruch durchaus im Bereich von Ereignissen mit ähnlichem Volumen liegen. Da die Bestimmung des maximalen Abflusses über die empirisch-statistische Beziehung einen direkten

Bezug zum involvierten Volumen stellt, muss hier angemerkt werden, dass die Abflusswerte für das Zukunftsszenario grosse Unsicherheiten beinhalten, da das Volumen selber über empirisch-statistische Beziehungen gewonnen wurde. Auch das Verhältnis zwischen dem skalierten Murgangvolumen und dem benutzten maximalen Abfluss ist mit grossen Unsicherheiten behaftet.

#### Maximale Auslaufdistanz

Die Auslaufdistanz ist für die Fragestellung, ob Siedlungsgebiet betroffen ist, von grosser Bedeutung. Die Datengrundlage beschränkt sich auf die Ereignisse 1977 und 2006. Daher wurde zuerst eruiert, wie gut die Abschätzung der maximalen Auslaufdistanz der Ereignisse 1977 und 2006 über die empirische Beziehung von Rickenmann (1999) ist. Die Auslaufdistanz über die empirische Formel unterschätzt die Auslaufdistanz sehr stark. Die in Betracht gezogene maximale Auslaufdistanz basiert daher auf den Ereignissen 1977 und 2006 und wird als Bereich zwischen Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und dem Murenschutzdamm definiert.

#### Abflusstiefe und Abflussgeschwindigkeit

In der deutschen und englischen Literatur existieren sehr wenige Angaben zu diesen beiden Variablen für das Untersuchungsgebiet. Die wenigen vorhandenen Angaben (in Yegorov 2007) und die eigene Feldbegehung zeigen, dass die Abflusstiefen je nach Ort bis etwa 6 Meter realistisch erscheinen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten gerade im Bezug auf die Modellierung von zukünftigen Szenarien wird die Abflusstiefe und -Geschwindigkeit, basierend auf Literatur (Egli 2005, WSL 2006, Romang und Bründl 2009) über einen minimalen Grenzwert miteinbezogen. Obwohl das Untersuchungsgebiet höchst wahrscheinlich eine andere Dynamik aufweist, werden die Grenzwerte, ab denen der modellierte Murgang als nicht mehr fliessfähig definiert wird, auf diesen Angaben basierend gesetzt. Dies auch aufgrund der Fragestellung nach der maximalen Reichweite, wo eine minimale Höhe und Fliessgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle spielt. Gemäss Egli (2005), WSL (2006) und Romang und Bründl 2009 können Murgänge Geschwindigkeiten zwischen 2-20m/s erreichen und Höhen zwischen 0.5 und 3m. Der hier gesetzte Minimalwert beträgt für die Fliesshöhe 0.2 m und für die Fliessgeschwindigkeit 1.5m/s.

Auf eine Schätzung durch empirisch-statistische Beziehungen wird hier bewusst verzichtet. Die Unsicherheiten dafür werden für das Untersuchungsgebiet als zu hoch bewertet. Rickenmann (1999) besagt, dass Murgänge kaum Werte von 20m/s übersteigen. Dieser Maximalwert wird auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Höhere Werte werden als Modellierungsartefakt betrachtet.

#### Fliesstransformationen

Worni et al. (2014) beschreibt, dass GLOF's oft Fliesstransformationen aufweisen und somit eine hohe Dynamik mit sich bringen. Diese Fliesstransformation ist vor allem von der Neigung des Abflusskanals und der Sediment- und Wasserverfügbarkeit abhängig (Hegglin und Huggel 2008, Worni et al. 2014). Solche Prozesse sind generell schwer in eine Modellierung miteinzubeziehen. Das Ereignis 1977 zeigt, dass zwischenzeitliche Blockaden mit erneutem Ausbrechen mit anderer Charakteristik möglich ist. Auch Yegorov (2007) beschreibt eine Fliesstransformation von granularer Charakteristik zu eher

hyperkonzentrierter Charakteristik im unteren Bereich des Untersuchungsgebietes. Diese Variable wird aufgrund der Limiten der benutzten Modelle vor allem qualitativ in die Auswertung der Modellergebnisse miteinbezogen. In der Modellierung werden die Reibungskoeffizienten und Neigungswinkel im Bereich, wo eine Fliesstransformation beschrieben wurde, angepasst.

#### Anzahl Murenschübe

Murgänge im Gerinne haben häufig eine schubartige Charakteristik. Dies wurde zum Beispiel auch beim Seeausbruch 1977 beobachtet, bei dem das Gesamtablagerungsvolumen aus mehreren Murenschüben hervorgeht. Aufgrund fehlender Information zu der Dimension der einzelnen Murenschüben, wurde hier auf eine Abschätzung und Modellierung dieser Charakteristik verzichtet. Stattdessen wurde die vereinfachende Annahme eines einzelnen Schubes getroffen.

#### 6.4.4.2 Kalibrierung

Die Backanalyse eines vergangenen Ereignisses ist wichtig um die Modellparameter zu kalibrieren und das Modell auf seine Anwendbarkeit für den modellierten Prozess zu testen (Worni et al. 2014).

Um aus einem Modell aussagekräftige Resultate zu erhalten, sollte es also wenn möglich mit vorhandenen Daten kalibriert werden. Die Datengrundlage im Untersuchungsgebiet ist relativ gering und basiert hier für beide Modelle auf lediglich zwei Ereignissen. Dies sind der Moränenseeausbruch im oberen Kumbeltal 1977 und die Niederschlagsmure 2006 im Nachbartal des Kumbel.

#### Moränenseeausbruch 1977 (nach Lentschke 2012)

Im August 1977 kam es zum Ausbruch des Gletschersees im oberen Teil des Kumbeltales. Intensiver Niederschlag führte zu rückschreitender Erosion der Rinne des Oberflächenabflusses. Das Wasser riss Moränenmaterial mit und bildete einen granularen Murgang, der sich schon ein paar hundert Meter weiter unten in flacherem Gebiet ablagerte. Das Wasser floss weiter und erreichte die steile Murenrinne. In ihr mobilisierte das Wasser viel Material und bildete den eigentlichen Murgang, der bis zum Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja gelangte und dort akkumulierte. Das aufgestaute Wasser der Flüsse führte zum erneuten Ausbrechen und Transport von Material bis zum Murenschutzdamm. Das ausgebrochene Seevolumen betrug knapp 75000 m<sup>3</sup>. Der maximale Abfluss im Bereich der Murenrinne liegt nach Lentschke (2012) bei 1000 m<sup>3</sup>/s, Blagovechshenskiy und Yegorov (2009) geben gar einen Wert von 10'000 m<sup>3</sup>/s an. Im oberen Teil betrug der Abfluss maximal 30 m<sup>3</sup>/s. Das Ereignis erfolgte in mehreren Schüben und über mehrere Tage. Das Totalvolumen betrug schlussendlich ungefähr 3 Millionen Kubikmeter Murenmaterial.

#### Niederschlagsmure 2006 (nach Yegorov 2007)

Der Murgang war zwar durch Niederschlag im Nachbartal des Kumbel ausgelöst, betraf jedoch den unteren Teil des Kumbeltales und das grosse Almatinka Tal und rechtfertigt den Miteinbezug, weil auch beim Ereignis 1977 ein grosser Teil des Murenmaterials im Flussgerinne durch Wasserüberschuss mobilisiert wurde. Das Gesamtvolumen betrug 500'000 m<sup>3</sup> und verursachte beträchtliche Schäden in den besiedelten Bereichen. Durch intensive Niederschläge wurde das Lockermaterial im Gerinne

mobilisiert und über einen Murgang talwärts verfrachtet. Am unteren Ende des Kumbeltales erreichte der Murgang seine maximale Intensität mit  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  und eine Fliesshöhe von 6m. Dort entstanden die ersten Schäden an der Strasse, welche über den Kumbelfluss führt. Das mitgeführte Gefüge erreichte Grössen bis  $3 \text{ m}^3$ . Danach reicht das Gefälle noch über ungefähr einen Kilometer um die Intensität aufrecht zu erhalten. Danach nahm die Intensität kontinuierlich ab und erste Ablagerungsbereiche traten auf. Die Intensität betrug hier noch ungefähr  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  mit einer Fliesshöhe von 3 m. Die Kraft reichte jedoch, um auch in den Bereichen, wo die Strasse nahe am Flussbett verläuft, diese zu unterspülen und mitzureissen. Zur eigentlichen Ablagerung kam es erst kurz vor dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja, wo sich das Tal verbreitert. Der Ablagerungsbereich erstreckte sich über 1.5 Kilometer mit einer Breite von bis zu 100 m. Danach transformierte sich der Murgang in einen Schlammstrom, welcher bis zum Murenschutzdamm floss. Im grossen Almatinka Tal befinden sich 11 Cafés, Restaurants und Hotels, welche ungefähr bis zu 1000 Menschen beherbergen können. Dies zeigt, dass Murgänge in dieser Region gefährlich sein können.

#### Kalibrierte Parameter

Ziel der Kalibration war, geeignete Wertepaare der beiden Reibungskoeffizienten  $\xi$  und  $\mu$  zu finden. Für die Kalibration ist es wichtig, den Einfluss und die Sensitivität der verschiedenen veränderbaren Parameter auf die Murgangcharakteristik zu evaluieren (z.B. Hussin et al. 2012). Die Sensitivitätsanalyse wurde durchgeführt, in dem für gleiche Wertepaare der Reibungskoeffizienten und gleichen Rahmenbedingungen jeweils einer dieser Parameter variiert wurde. Dazu wurden insgesamt 97 Kalibrierungsläufe für die Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse der Reibungskoeffizienten durchgeführt und jeweils 4 Läufe, um die Sensitivität bestimmter veränderbarer Parameter (vgl. unten) zu testen. Die Simulationen wurden, basierend auf den gestellten Kriterien, visuell in RAMMS und in ArcMap über Zellstatistiken und Differenzen evaluiert. Für das Finden geeigneter Werte für die Reibungskoeffizienten wurde iterativ (z.B. Quan Luna et al. 2011 und Hussin et al. 2012) vorgegangen. Es werden hier die Parameter vorgestellt, welche in der Modellierung verändert und auf ihre Sensitivität getestet wurden. Parameter welche gemäss der Empfehlung der WLS bei der Default-Einstellung beibehalten wurden, werden nicht beschrieben.

- Coulomb Reibung: Die coulomb Reibung wird vor allem dann wirksam, wenn der Murgang kurz vor dem Stoppen ist. Sie beeinflusst massgeblich die Reichweite eines Murganges. Dieses Resultat zeigen auch Hussin et al. (2012) in ihrer Studie. Geringeren Einfluss hat sie auch auf die Höhen- und Geschwindigkeitswerte. Je tiefer der Wert, desto weiter fliesst der Murgang und die Höhen- und Geschwindigkeitswerte steigen.
- Turbulente Reibung: Die turbulente Reibung beeinflusst die Dynamik des Murganges, wenn dieser schnell fliesst. Die Geschwindigkeit und Höhe des Murganges wird durch diesen Parameter massgeblich beeinflusst. Je höher der Wert, desto höher und schneller wird der Murgang. Dieses Resultat erhalten auch Hussin et al. (2012) in ihrer Studie. Im geringeren Masse beeinflusst es die Reichweite, da bei schnellerem Fliessen bei gleicher Zeit eine grössere Distanz zurückgelegt werden kann. Zu hohe Werte können zu unrealistischen lokalen Geschwindigkeitsmaxima und Höhenmaxima führen.

- **Ausbruchsvolumen:** Das Ausbruchsvolumen bestimmt massgeblich die Höhen- und Geschwindigkeitswerte und die Reichweite bei gleichbleibenden Bedingungen. Je grösser das Ausbruchsvolumen, desto grösser die Reichweite und die Höhen- und Geschwindigkeitswerte werden im Mittel höher. Es wurde festgestellt, dass ein Mindestvolumen von 500'000 m<sup>3</sup> notwendig ist, um den Zusammenfluss Prochodnaja in sinnvoller Zeit zu erreichen.
- **Maximaler Abfluss:** Der maximale Abfluss wirkt sich auf die Zeit aus, die für den Durchgang des gesamten bewegten Volumens benötigt wird. Je höher der Wert, desto schneller ist der Durchgang des bewegten Volumens. Probleme können sich ergeben, wenn die Durchgangszeit relativ lang wird. Der Murgang kann dann für die Situation in der Realität zu langsam fließen. Dieses Problem wurde im oberen Teil des Untersuchungsgebietes ersichtlich bei der Kalibration des Ereignisses 1977. Dieses Problem kann nur durch Veränderung der Reibungswerte und vor allem des maximalen Abflusses behoben werden. Jedoch können dann die Reibungskoeffizienten Werte annehmen, die kritisch hinterfragt werden sollten.
- **Zeitpunkt des maximalen Abflusses in der Abflusskurve:** Beeinflusst die Geschwindigkeits- und Höhenverteilung geringfügig und somit auch die Reichweite. Die Sensitivität auf die Resultate wird hier als zu geringfügig beurteilt, als dass dieser Wert kalibriert wird.
- **Momentum der Massenbewegung:** Über das Momentum kann definiert werden, wann der Murgang aufhört zu fließen. Einen zu hohen Wert kann den Murgang früher als in der Realität beobachtet stoppen. Einen zu tiefen Wert lässt den Murgang länger fließen als in der Realität beobachtet. Im Untersuchungsgebiet konnte der Murgang nie aufgrund des Momentum zum Stoppen gebracht werden. Besonders im oberen Teil des Gebietes blieb das Momentum hoch, obwohl der Murgang unrealistisch tiefe Geschwindigkeiten aufwies. Die festgelegte Minimalhöhe und –Geschwindigkeit konnte aber den Murgang wieder in den realistischen Rahmen bringen und als Stoppkriterium genutzt werden.
- **Laufzeit:** Die Laufzeit beschreibt die Fließdauer des Murganges. Wird sie kürzer gewählt als das Momentum des Murganges noch über dem Schwellenwert liegt, so stoppt der Murgang frühzeitig. Manchmal kann es zu unrealistisch langsamem Fließen des Murganges oder unrealistisch tiefen Höhenwerten kommen. Ein frühzeitiges Stoppen durch die Laufzeit macht dann Sinn und wurde hier als weiteres Stoppkriterium benutzt.
- **Laufrichtung:** Die Laufrichtung definiert die Fließrichtung beim Start. Wird diese falsch angegeben und zeigt zum Beispiel gegen einen Hang statt zur Rinne talwärts, so verändert sich die Fließcharakteristik. Der Murgang fließt langsamer und divergierender und kann frühzeitig steckenbleiben.

Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Pixelauflösung der Höhenmodelle auf die Modellierungsergebnisse analysiert.

## Kalibrierungskriterien

Um Wertepaare als brauchbar zu beurteilen, wurden dafür mehrere Kriterien bestimmt:

- Auslaufdistanz: Die Auslaufdistanz muss mindestens den Zusammenfluss Prochodnaja erreichen.
- Zeit: Die Zeit bis zum Erreichen des Zusammenflusses Prochodnaja muss in einem realistischen Rahmen liegen und wurde hier auf 2h gesetzt.
- Fliessweg: Der Fliessweg sollte den realen Bedingungen möglichst gut entsprechen. Dies wurde im Vergleich mit hochaufgelösten Luftbildern (Google Earth) und eigenem Begutachten im Feld beurteilt. Simulierte Murgänge mit unrealistisch hoher seitlicher Ausschering oder zu flächigem Abfluss wurden ausgeschlossen. Ein gewisser Grad an flächigerem Abfluss als in Realität muss aufgrund der Auflösung der Höhenmodelle in Kauf genommen werden.
- Abflusstiefe: Die minimale Abflusstiefe muss 0.2m betragen, damit die simulierte Bewegung als Murgang akzeptiert wird.
- Abflussgeschwindigkeit: Die minimale Abflussgeschwindigkeit muss 1.5 m/s betragen, damit die simulierte Bewegung als Murgang akzeptiert wird.

### 6.4.5 Ausbruchsszenarien für RAMMS für die aktuelle und zukünftige Situation

Basierend auf den Kalibrationsergebnissen (Kapitel 7.1) und den Unsicherheiten (Kapitel 8) wird die Modellierung der späteren Szenarien in zwei Schritte getrennt: Den Seeausbruch im oberen Teil und den Murgang ab dem mittleren Teil bis zum Murenschutzdamm. Testweise wurden Modellläufe ab dem See mit den Werten ab der Murgangrinne den Resultaten ab der Murgangrinne gegenübergestellt. Die Modellierung wurde mit dem ASTER GDEM und dem SRTM DHM bei 20m Auflösung durchgeführt. Folgende Wertepaare werden in den Szenarien für die aktuelle und zukünftige Situation in der Murgangrinne getestet (Es sind jeweils die einzelnen Werte für den oberen, mittleren und unteren Teilbereich angegeben):

Table 12: Wertepaarkombinationen der Reibungskoeffizienten in der Ausbruchmodellierung ab der Murgangrinne mit RAMMS.

| Modelllauf | $\mu$ [-]      | $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ] |
|------------|----------------|---------------------------|
| 1          | 0.1/0.1/0.05   | 1000/1000/1500            |
| 2          | 0.1/0.1/0.05   | 800/8000/1500             |
| 3          | 0.1/0.1/0.05   | 600/6000/1500             |
| 4          | 0.1/0.1/0.05   | 300/300/1500              |
| 5          | 0.08/0.08/0.05 | 1000/1000/1500            |
| 6          | 0.08/0.08/0.05 | 800/8000/1500             |
| 7          | 0.08/0.08/0.05 | 600/6000/1500             |
| 8          | 0.08/0.08/0.05 | 300/300/1500              |
| 9          | 0.06/0.06/0.05 | 1000/1000/1500            |
| 10         | 0.06/0.06/0.05 | 800/8000/1500             |
| 11         | 0.06/0.06/0.05 | 600/6000/1500             |
| 12         | 0.06/0.06/0.05 | 300/300/1500              |
| 13         | 0.08/0.12/0.05 | 1000/1000/1500            |
| 14         | 0.08/0.12/0.05 | 600/6000/1500             |
| 15         | 0.08/0.12/0.05 | 300/300/1500              |

Die getesteten Volumina und maximale Abflüsse für jeden Lauf sind:

Tabelle 13: Getestete Volumina und maximale Abflüsse in der Ausbruchmodellierung mit RAMMS.

|                              | Volumen [m <sup>3</sup> ] | Maximaler Abfluss [m <sup>3</sup> /s] |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Aktuell 3faches Seevolumen   | 750'000                   | 1000                                  |
| Aktuell 6faches Seevolumen   | 1'500'000                 | 3000                                  |
| Zukünftig 3faches Seevolumen | 4'500'000                 | 10'000                                |
| Zukünftig 6faches Seevolumen | 9'000'000                 | 10'000                                |

Für den oberen Teil werden für beide Szenarien folgende Wertepaare, Volumina und maximale Abflüsse getestet:

Tabelle 14: Getestete Wertepaarkombinationen der Reibungskoeffizienten in der Ausbruchmodellierung ab dem See mit RAMMS.

| Modelllauf | $\mu$ [-] | $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ] |
|------------|-----------|---------------------------|
| 2          | 0.14      | 200                       |
| 1          | 0.14      | 400                       |
| 3          | 0.16      | 200                       |
| 4          | 0.16      | 400                       |
| 5          | 0.18      | 200                       |
| 6          | 0.18      | 400                       |
| 7          | 0.2       | 200                       |
| 8          | 0.2       | 400                       |

Tabelle 15: Getestete Volumina und maximale Abflüsse in der Ausbruchmodellierung ab dem See mit RAMMS.

|                        | Volumen [m <sup>3</sup> ] | Abfluss [m <sup>3</sup> /s] |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Aktuelles Seevolumen   | 246'500                   | 533                         |
| Zukünftiges Seevolumen | 1'512'490                 | 1795                        |

## 7. Ergebnisse und Auswertung

### 7.1 Kalibrationsergebnisse RAMMS

#### 7.1.1 Reibungskoeffizienten

Für realistische Ergebnisse musste dem coulomb Reibungskoeffizienten einen Wert an der unteren Grenze des Empfehlungsbereiches zugeschrieben werden, für den turbulenten Reibungskoeffizienten eher Werte an der oberen Grenze des Empfehlungsbereiches der WSL. Auf ähnliche Ergebnisse kamen auch Mergili et al. (2011) für ihre Fallstudie im Pamirgebirge, welche sogar Werte ausserhalb des Empfehlungsbereiches anwendeten. Da der Empfehlungsbereich vor allem auf Daten aus der Schweiz basiert, besteht die Möglichkeit, dass dieser in anderen Gebieten unzureichend zutrifft. Des weiteren wurde eine hohe Equifinalität und damit verbunden grosse Unsicherheiten für geeignete Wertepaare beobachtet. Dies vor allem für den turbulenten Reibungskoeffizient, da eine extrem hohe Sensitivität auf den coulomb Reibungskoeffizient beobachtet wurde (z.B. auch Genolet 2002 in Rickenmann 2005 oder Hussin et al. 2012). Diese Sensitivität ist so stark, dass eine grosse Bandbreite für den turbulenten Reibungswert möglich wird, ohne das Resultat im hier möglichen Detailgrad entscheidend zu beeinflussen. Generell gilt jedoch, je höher der turbulente Reibungswert, desto höher die Maximalgeschwindigkeiten und –höhen, so dass anhand dieser Maximalwerte ein Limit für den turbulenten Reibungswert gesetzt wurde. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde entschieden, für beide Reibungskoeffizienten Wertebereiche statt best-fit Wertepaare für die Teilstrecken bei der prognostischen Modellierung zu definieren. Durch mehrere Modellläufe konnten so die Breite der möglichen Resultate und die damit verbundenen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Folgende Wertebereiche wurden für die drei Teilbereiche gefunden und in der folgenden Szenarienmodellierung getestet:

*Tabelle 16: Wertebereiche der Reibungskoeffizienten  $\mu$  und  $\xi$  für die Szenarienmodellierung mit RAMMS.*

|                | $\mu$ [-] | $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ] |
|----------------|-----------|---------------------------|
| Oberer Teil    | 0.16-0.2  | 100-300                   |
| Mittlerer Teil | 0.06-0.1  | 300-1000                  |
| Unterer Teil   | =<0.05    | 800-1500                  |

Es muss hier noch die Bemerkung angefügt werden, dass die Werte für den turbulenten Reibungskoeffizient im oberen Teil eher höher sein mussten, da sonst die Geschwindigkeiten eher unterschätzt wurden und ein unrealistisches Vorwärtskriechen entstand. Der untere Teil gestaltete sich als sehr schwierig zu kalibrieren. Dies kann auf die Kombination von realer Topographie und Höhemodellauflösung begründet werden. Die Sensitivitätsanalyse auf die Reibungskoeffizienten sprach beim turbulenten Reibungskoeffizient aber eher für hohe Werte und für eher sehr tiefe Werte beim coulomb Reibungskoeffizient.

### 7.1.2 Unsicherheiten

Die Qualität der Höhenmodelle, die topographische Situation und die Tatsache dass der Murgang in mehreren Schüben Material ins Tal transportierte, stellte die Kalibration vor eine Herausforderung, die vereinfachende Annahmen verlangte und Unsicherheiten mit sich brachte. Im Speziellen sollen folgende Unsicherheiten hervorgehoben werden:

- Die Auflösung der Höhenmodelle GDEM und SRTM ist mit 30 m bzw. 90 m (auf 30 m heruntergerechnet) relativ grob und führt zu einer weicheren Topographie. Dies kann Unsicherheiten in der Modellierung eines Murgangs hervorrufen. Der Murgang kann zum Beispiel divergierend fließen, was zu einem zu raschen Massenverlust beziehungsweise weniger fokussierterem Fließen im Modell führt. Dies kann zu verfälschten Höhen- und Geschwindigkeitsangaben des Murganges führen. Es können auch Gebiete überflossen werden, welche in der Realität unüberwindbar wären für den Murgang oder wo es zum Aufstauen führt. Ebenfalls hat der generische Typ des Höhenmodells einen Einfluss auf die Resultate und der Vergleich von Höhenmodellen mit verschiedener Herkunft ist wichtig. Eine kurze Evaluation der Potentiale der beiden Höhenmodelle zur Murgangmodellierung in RAMMS führte zum Ergebnis, dass beide die generellen Tendenzen angeben, dass aber das SRTM vor allem in flacheren Teilen viel flächiger modelliert als das GDEM. In der Murgangrinne existieren 2 Problemstellen (Brücke und Murenschutzwall) welche vom SRTM besser modelliert werden. Dies ist aber nicht auf eine bessere Abbildung der Realität zurückzuführen sondern eher auf die vereinfachte weichere Topographie.
- Die Topographie in den Höhenmodellen entspricht nicht der Topographie von 1977. Insbesondere die Ablagerungsbereiche und im unteren Teil die neu entstandene Vegetation können zu grösseren Unsicherheiten führen.
- Die Start- und Endvolumendifferenz ist extrem hoch ( $75'000 \text{ m}^3$  vs.  $3'000'000 \text{ m}^3$ ). Das Volumen der einzelnen Murenschübe, welche durch die Murenrinne bis zum Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja gelangten, waren nicht bekannt. Angaben zur charakteristischen volumetrischen Feststoffkonzentration von Murgängen in dieser Region (z.B. Rickenmann 2003) sind ebenfalls kaum vorhanden und die Abschätzung von zusätzlicher Wasserzufuhr aus Nebenflüssen sowie Hangwasser war hier nicht möglich. Murenschübe zu modellieren war hier deswegen nicht möglich. Für die Modellierung wurde daher das Konzept der Black-Box angewendet. Bei vergangenen Ereignissen sind der Input und der totale Output bekannt. Was dazwischen passierte, konnte anhand der verwendeten Literatur nicht eruiert werden. Es stellt sich die Frage, ob mit einem Murgang für ein mögliches Endvolumen gerechnet werden sollte, oder mit etwas kleinerem Volumen, da Murgänge oft in mehreren Schüben Material transportieren und so das Gesamtvolumen aufbauen. In dieser Arbeit wurde die Modellierung eines möglichen Endvolumens über empirisch-statistische Beziehungen, Literaturwerte anderer Ereignisse im gleichen Gebiet und iterativ in RAMMS selber angewendet. So erhält man direkt auch ein worst-case Szenario.
- Die stark variierende topographische Situation entlang des Untersuchungsgebietes und eine hohe Gesamtlänge der Murgangstrecke erschwerte die Kalibration der Reibungsparameter

für sinnvolle Ergebnisse. Die Murgangstrecke konnte in mindestens drei unterschiedliche Bereiche für die Reibungscharakteristik unterteilt werden. RAMMS indes erlaubt nicht mehr als drei Teilgebiete mit unterschiedlicher Reibungscharakteristik. Die Tatsache, dass der oberste Teil relativ flach ist, der eigentliche Murgang vor allem in der Murenrinne generiert wird und der unterhalb des Sees entstandene Murgang im oberen Teil abgelagert und nur das Wasser in die Murenrinne stürzt, musste spätestens bei der Modellierung für die aktuelle und potentiell zukünftige Situation differenzierter behandelt werden. Das Ereignis 1977 hat auch aufgezeigt, dass der maximale Abfluss beim See markant tiefer liegen kann als der maximale Abfluss für den generierten Murgang. Zwei Möglichkeiten, um diesen Problematiken zu begegnen, wurden hier berücksichtigt:

- Es wird bereits ab dem See ein Murgang, wie er in der Murenrinne angenommen wird, modelliert und die kalibrierten Werte für den oberen Teil tiefer gesetzt, um den Murgang forciert über den flacheren Bereich bis zur Murenrinne fließen zu lassen. Der obere Teil besitzt dadurch in den Ergebnissen höhere Unsicherheiten. Für die drei identifizierten Teilbereiche werden unterschiedliche Reibungscharakteristiken angenommen.
- Der obere Teil wird getrennt vom mittleren und unteren Teil modelliert. Da ein kleineres Startvolumen und kleinerer maximaler Abfluss im oberen Teil als das Volumen im mittleren und unteren Teil wahrscheinlich ist, soll der eigentliche Murgang ab dem mittleren Teil modelliert werden. Diese Variante wurde hier als besonders geeignet betrachtet, da die topographische Situation im oberen Teil als sensitiv für die Charakteristik eines Murganges nach dem Ausbruch des Sees beurteilt wurde.

Die Kalibration erfolgte daher für jede Teilstrecke getrennt. Die Modellierung der späteren Szenarien wurden in zwei Schritte getrennt: Der Seeausbruch im oberen Teil und der Murgang ab dem mittleren Teil bis zum Murenschutzdamm. Testweise wurden 4 Modellläufe ab dem See unter gleichen Bedingungen modelliert.

- Murgänge können in ihrer Charakteristik stark variieren, selbst im gleichen Untersuchungsgebiet. Die Reibungsparameter können daher stark variieren und es muss mit equifinalen Parametersets gerechnet werden (Rickenmann 2005). Der auch hier beobachtet Equifinalität wird durch die Methodik mehrerer Durchläufe und deren statistischer Auswertung begegnet.
- Die Kalibration basierte auf zwei Ereignissen, wobei nur eines einen Moräneseausbruch beschreibt. Weiter waren in deutscher oder englischer Sprache keine weiteren Seeausbrüche genauer beschrieben, um die Charakteristik von Murgängen durch Seeausbrüche sicher abzuschätzen. Die Kalibration war somit selber mit grossen Unsicherheiten auch in Bezug auf die Modellierung für die aktuelle und zukünftige Situation behaftet.
- Es zeigte sich eine hohe Abhängigkeit zum coulomb Reibungskoeffizient und dadurch eine erschwerte Bestimmung des turbulenten Reibungskoeffizienten und hohe Equifinalität.

- Der coulomb Reibungskoeffizient musste sehr tief gehalten werden, damit der Murgang realistische Laufzeiten aufwies. Die Werte konnten nicht auf ihre Plausibilität überprüft werden.

## 7.2 Simulationsergebnisse MSF

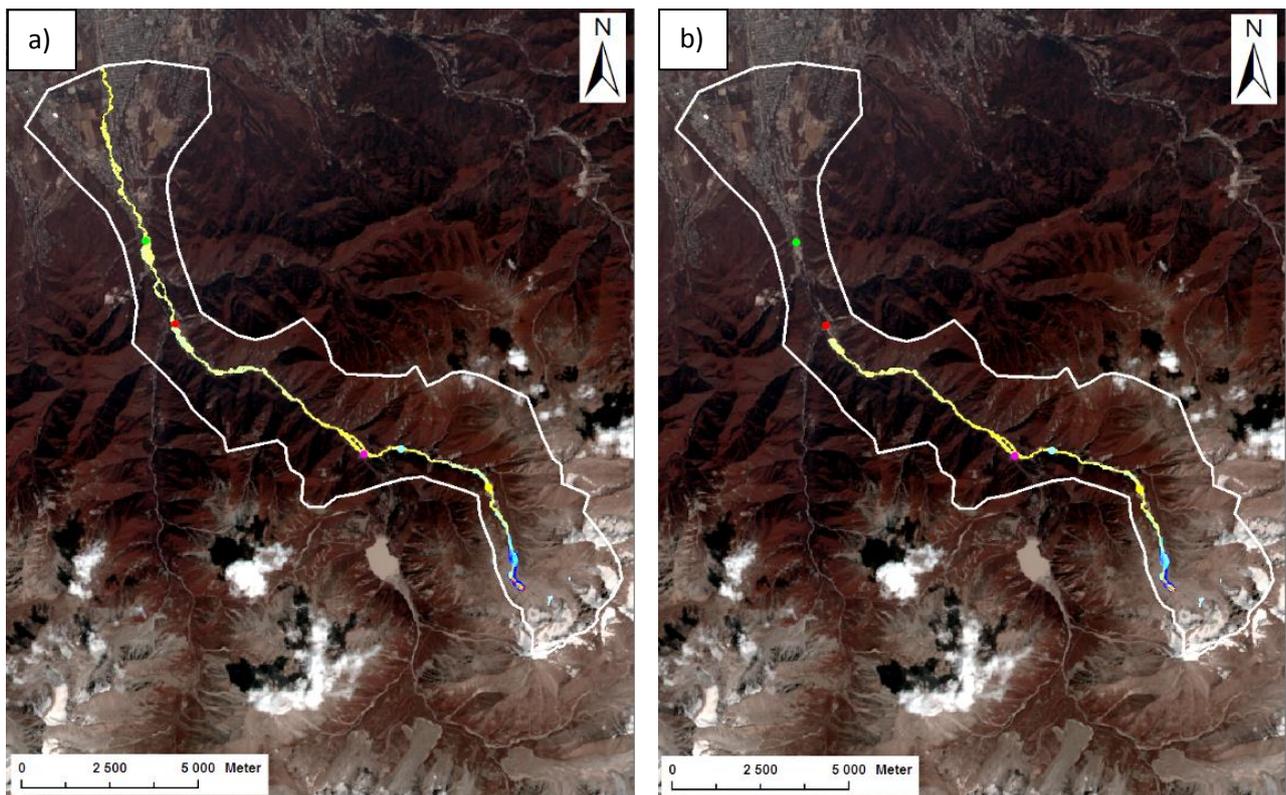
### 7.2.1 Neigungskriterium

Um eine Ablagerung noch vor Erreichen der Murgangrinne zu erreichen, sind Werte, welche für granulare Murgänge gelten, notwendig. Das heisst, eine Ablagerung im beschriebenen Bereich wird bei einer Neigung von ungefähr  $11^\circ$  erreicht. Der nächste, für die Simulation wichtige Abschnitt, ist die Murenbildung in der Murgangrinne bis zum Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja, wo das Material abgelagert wurde. Dies kann bei einer durchschnittlichen Neigung von knapp  $8^\circ$  erreicht werden. Das Erreichen des Murenschutzdammes erfolgt bei einer kritischen Neigung von  $7^\circ$ . Die Berücksichtigung der realen Gegebenheiten, dass der eigentliche Murgang erst in der Murgangrinne mobilisiert wurde, führt zu leicht anderen notwendigen kritischen Neigungen. Ein Ausbruch ab der Murgangrinne zeigt bei einer kritischen Neigung von  $11^\circ$  eine Reichweite bis zum Wasserkraftwerk. Bei einer kritischen Neigung von  $8^\circ$  bleibt der Murgang weit vor dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja, und zwar kurz vor dem Zusammenfluss mit dem Fluss Ajusai, stehen. Eine kritische Neigung von  $6^\circ$  zeigt eine Reichweite knapp über den Murenschutzdamm an. Eine erneute Mobilisation des Materials ab dem Zusammenfluss bis zum Murenschutzdamm, erfolgt ab einem Wert von knapp  $4^\circ$ . Wobei hier berücksichtigt werden muss, dass die Topographie im DHM nicht der Topographie von 1977 entspricht und die Ablagerungen von 1977 (und im GDEM eventuell auch 2006) beinhaltet. Dennoch kann der aktuell erhaltene Wert für die Modellierung der aktuellen und zukünftigen Situation nützlich sein. Neues Material würde nämlich eher auf diese Topographie wie sie in der Simulation benutzt wurde, treffen. Für das Erreichen des Zusammenflusses mit dem Fluss Prochodnaja ist ab der Murgangrinne ein Neigungswert von  $7^\circ$  und für das Erreichen des Murenschutzdammes einen Neigungswert von  $6^\circ$  nötig.

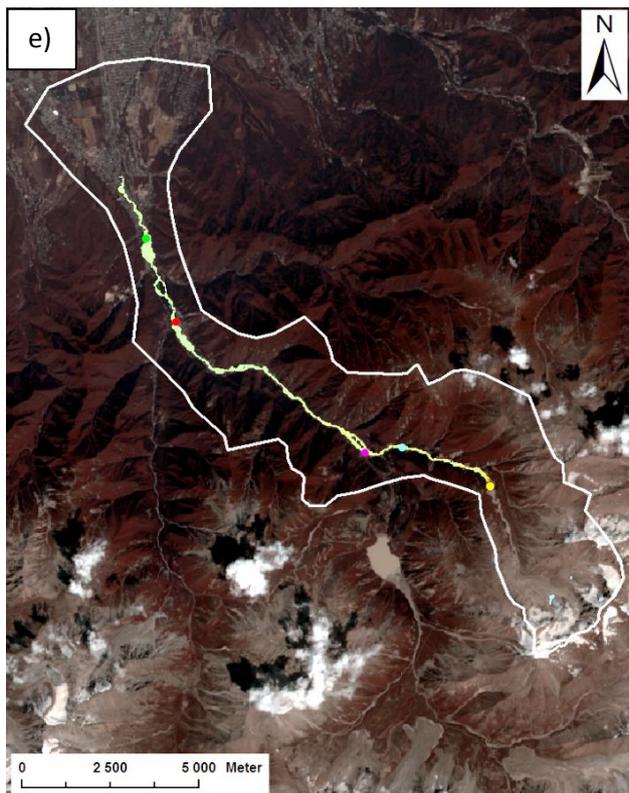
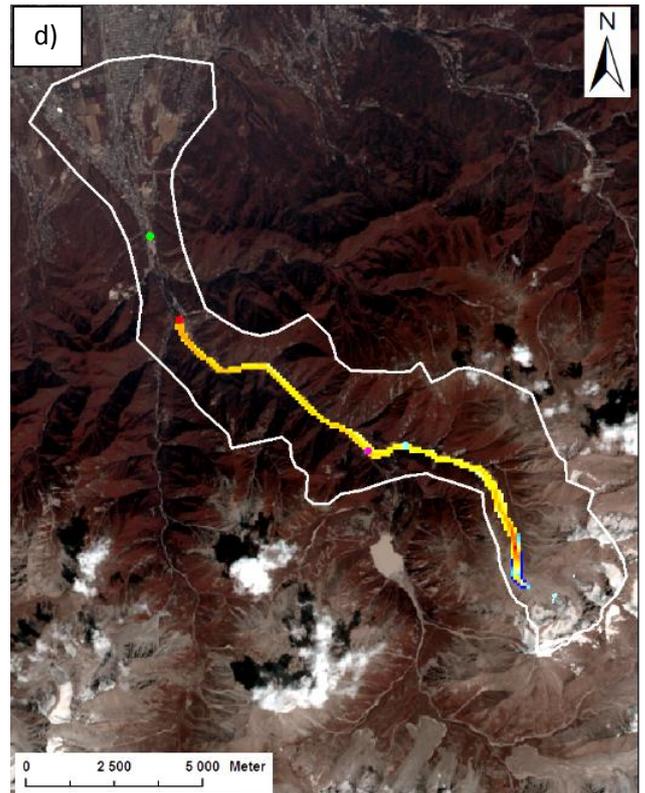
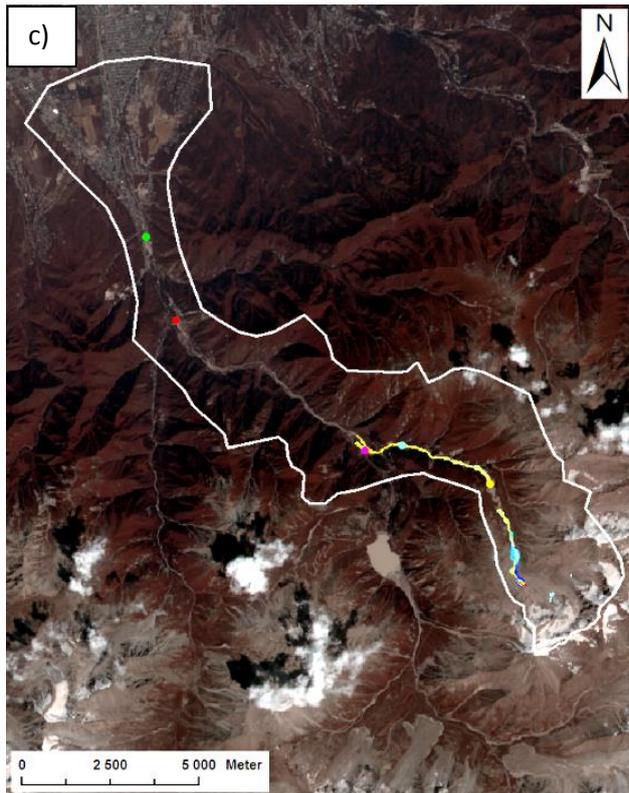
### 7.2.2 Unsicherheiten

Generell kann gesagt werden dass, je weiter unten im Tal der Murgang anreisst, desto höher muss der Wasseranteil sein, damit der Murgang den Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja oder den Murenschutzdamm erreicht. Dementsprechend wird der kritische Neigungswert tiefer. Dies entspricht sehr gut den realen Gegebenheiten von 1977. Es muss aber hier angemerkt werden, dass der mathematische Hintergrund des MSF Modells bei der vorliegenden Topographie auch tiefere Neigungswerte bei tieferer Anrissstelle für die gleiche Reichweite verlangt. Die Lage des Anrissgebietes bei gleichbleibendem Neigungskriterium beeinflusst also die Reichweite entscheidend. Die parallele Simulation des Ereignisses 1977 mit den Neigungskriterien  $11^\circ$  und  $8^\circ$  zeigten, dass die totale Reichweite vor allem bei  $11^\circ$  massiv unterschätzt wird. Bei  $8^\circ$  kommt es je nach Wahl des Anrissortes zur starken Unterschätzung oder zur guten Annäherung der realen Gegebenheiten. Bezüglich der maximalen Reichweite zeigt sich also die Wahl des Anrissortes als sensitiver Parameter. Ein korrektes gebietsspezifisches Prozessverständnis ist demnach essentiell für die Abschätzung der Reichweite. Die

Wahl des Höhenmodelles bei gleicher Pixelauflösung hatte hier keinen entscheidenden Einfluss auf die Resultate der Reichweite. Als Sonderfall muss hier der Stadtteil von Almaty, der im Höhenmodell abgebildet ist, betrachtet werden. Dort zeigten die Modellläufe mit dem SRTM DHM gegenüber denen mit dem ASTER GDEM eine flächige Inundation über einen grossen Teil des Stadtgebietes. Dies muss klar der Auflösung des Höhenmodells als Ursache zugeschrieben werden. Die Wahl des Höhenmodelles hatte jedoch Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitswerte. Mit dem ASTER GDEM ergaben sich generell tiefere Wahrscheinlichkeiten als für die Ergebnisse mit dem SRTM DHM. Dies kann auf die Auflösung und den dadurch bedingten Einflüsse auf die Topographie zurückgeführt werden. Die Auflösung wirkt sich auch auf den Detaillierungsgrad der möglichen betroffenen Gebiete aus. Die Sensitivitätsanalyse auf die unterschiedliche Auflösung ergab, dass die Reichweite ebenfalls kaum beeinflusst wird. Die Wahrscheinlichkeitswerte hingegen unterscheiden sich markant. Dies bedeutet hier, dass eine tiefere Auflösung zu höheren Wahrscheinlichkeitswerten führt. Die Wahrscheinlichkeitswerte reagierten leicht auf die Wahl des Anrissortes, jedoch nicht in dem Masse, dass die Aussagen im hier möglichen Detailgrad davon beeinflusst werden. Die Abbildung 23 gibt einen Überblick über das hier besprochene.



- Murenschutzdamm
  - Zusammenfluss grosser Almatinka-Fluss mit Fluss Prochodnaja
  - Wasserkraftwerk und seitlicher Murenschutzwall
  - Ende Kumbeltal
  - Anfang Murenrinne
  - Seen
- Gefährdungswahrscheinlichkeit**
- tief  
■ hoch



- Murenschutzdamm
  - Zusammenfluss grosser Almatinka-Fluss mit Fluss Prochodnaja
  - Wasserkraftwerk und seitlicher Murenschutzwall
  - Ende Kumbeltal
  - Anfang Murenrinne
  - Seen
- Gefährdungswahrscheinlichkeit**
- tief  
■ hoch

Abbildung 23: MSF Modellergebnisse des Ereignisses 1977. Bild a-c: Reichweite bei 6°, 8°, 11°. Bild d: Einfluss der Auflösung auf die Wahrscheinlichkeitswerte und Reichweite im Vergleich bei 8°. Bild e: Einfluss der Wahl des Anrissortes auf die Reichweite und Wahrscheinlichkeitswerte bei 6° im Vergleich.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die totale Reichweite des Ereignisses 1977 zwischen 6° und 8° erreicht wird. Die Gefährdungswahrscheinlichkeit liegt dabei im mittleren Bereich.

## 7.3 Modellbasierte Abschätzung eines Eis-Felsabbruches als Triggermechanismus

### 7.3.1 Modellresultate

Für den Gorelniksee wird durch die Modellierung in RAMMS mit allen Höhenmodellen ein vergleichbares Resultat mit grösserem oder kleinerem Detailgrad erhalten. Von dem markanten Hängegletscher (Abb. 24), dem hier das grösste Potential für einen Eisabbruch zugeschrieben wird, führt der modellierte potentielle Weg direkt in den See. Dies für beide benutzten Wertepaare für die Reibungskoeffizienten. In Abbildung 26 ist der modellierte Verlauf anhand des Resultates aus dem GeoEye Höhenmodell abgebildet. Das MSF Modell zeigt bei einem unteren Grenzwert von  $17^\circ$  je nach Lage der Ausbruchszone einen Seeimpakt an. Mit dem SRTM Höhenmodell wird dabei ein Seeimpakt einfacher erreicht als mit dem ASTER GDEM und GeoEye Höhenmodell. Aus den höchsten Lagen wird der aktuelle See erreicht. Aus tieferen Lagen erreicht ein modellierter Eisabbruch den aktuellen See nicht. Wird das Resultat auf die Situation mit dem potentiell zukünftigen Seevolumen projiziert, so ist ein Seeimpakt wahrscheinlicher.

Die Modellläufe mit RAMMS zeigen auch beim See Sovetov vergleichbare Resultate zwischen den Höhenmodellen. Der grösste Unterschied zeigt sich zwischen den Resultaten mit dem SRTM Höhenmodell und den Resultaten vom ASTER und GeoEye Höhenmodell. Die Resultate mit dem SRTM Höhenmodell zeigen einen forcierten, flächigeren Bewegungsweg. Mit dem SRTM Höhenmodell wird es möglich, die flachere Topographie und Rampenzone des Gletschers, welche viele Spalten aufweist, zu überfliessen, während mit den höher aufgelösten Modellen dieser Bereich tendenziell umflossen wird (Abb. 26c). Begründet werden kann dies durch die weichere Topographie im SRTM Höhenmodell. Unebenheiten können dadurch einfacher überflossen werden. Die Eigenschaft des SRTM Höhenmodelles solche Strukturen zu überfliessen, wird hier bei der Eislawinen-Modellierung als brauchbarer Gegensatz zu den beiden anderen Höhenmodellen beurteilt. Sturzprozesse wie Eislawinen oder Fels-Eislawinen überwinden kleinere Unebenheiten oder flachere Topographie über eine gewisse Distanz einfacher als zum Beispiel reine Fliessprozesse. Da hier mit der RAMMS Version für Murgänge gearbeitet wurde, wird dies als nützliche Eigenschaft betrachtet. Es muss aber bemerkt werden, dass mit dem SRTM Höhenmodell beim oberen Grenzwert für den coulomb Reibungskoeffizient die Bewegung nicht mehr über die Rampe stattfand sondern sogar oberhalb stecken blieb. Im Gegensatz dazu zeigten die Ergebnisse mit den anderen Höhenmodellen, dass der See auch bei dem oberen Grenzwert potentiell erreicht wird. Mit dem MSF Modell zeigt sich, ähnlich wie beim Gorelniksee und zu den Resultaten mit RAMMS, der Unterschied zwischen den Resultaten mit dem SRTM Höhenmodell zu den beiden anderen Höhenmodellen. Im Gegensatz zu RAMMS zeigen die Resultate mit dem MSF eine geringere Reichweite der modellierten Eisabbrüche auf. Der aktuelle See wird nur aus wenigen Lagen erreicht. Mit Blick auf die zukünftige potentielle Ausdehnung des Sees nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Eislawine den See trifft, zu (Abb. 26b). Abbildung 25 zeigt die potentiellen Abbruchstellen oberhalb des See Sovetov.

### 7.3.2 Unsicherheiten

Die Auflösung der Höhenmodelle und die Auflösung und Qualität der zugrundeliegenden Fernerkundungsdaten zeigten sich hier als stark einflussreiche Komponente für die Modellierung. Die Kinetik eines Eis-Felssturzes kann durch die weichere Topographie im SRTM DHM besser unterstützt werden. Dies aber nur in Abhängigkeit vom Volumen des Eis-Felsabbruches. Weichere Topographie ist besser geeignet für grosse Volumen mit viel kinetischer Energie, für kleinere Volumen ist eine genauere Abbildung der Topographie notwendig (Schneider et al. 2010). Da die möglichen Abbruchvolumen in diesem Fallbeispiel als schwierig zu bestimmen beurteilt wurde, bringt diese Tatsache Unsicherheiten in die Modellergebnisse. Die Modellierung mit dem ASTER GDEM, GeoEye DHM und SRTM DHM war eine wertvolle Ergänzung um diesen Unsicherheiten zu begegnen. Eine weitere Unsicherheit bringt die verwendete RAMMS Version in die Modellergebnisse, das dies für Murgangprozesse ausgerichtet ist. Die Kombination mit dem MSF Modell war deswegen sinnvoll.

### 7.3.3 Gefährdungspotential

Die Topographie bezüglich Krümmung und Rauigkeit und die Geländecharakteristik unterhalb des Abbruchortes sowie das Volumen spielen eine wesentliche Rolle für die Reichweite (Huggel et al. 2004, Nötzli et al. 2006). Die Charakteristik des Geländes (z.B. Gletscherspalten oder Schneefelder) kann das Volumen verkleinern oder vergrössern sowie die Reibungscharakteristik durch die unterschiedliche Rauigkeit und somit die Reichweite verändern. Mögliche Richtungsänderungen beeinflussen die Reichweite ebenfalls.

Der Bereich zwischen potentiellen Abbruchstellen und dem Gorelniksee (Abb. 24) besteht aus Gletschereis und Schutt, beziehungsweise schuttbedecktem Eis. Die Oberflächenrauigkeit ist daher variabel. Das Gelände flacht stetig bis zum See ab. Dadurch werden die Modellläufe, welche keinen Seeimpakt aus tieferen Lagen anzeigen, als plausibel beurteilt. Aufgrund der Geländecharakteristik und der Krümmung besteht eher das Potential zur Volumenabnahme während eines Ereignisses, als einer Volumenzunahme. Auch die mögliche zukünftige Topographie bei weiterem Gletscherrückzug, wirkt sich vermutlich eher negativ auf das Potential eines Seeimpaktes aus, solange der See nicht an Volumen gewinnt. Die Modellläufe zeigen in Bezug auf Richtungsänderungen an, dass ein Abbruch für einen Seeimpakt etwas umgeleitet werden muss. Die Feldbegehung bestätigt diesen Modellverlauf. Gerade der Hängegletscher, der das grösste Potential für einen Abbruch hat, liegt nicht direkt in der Falllinie zum See. Die Resultate zeigen, dass das Potential für einen Seeausbruch durch einen Eis-Felsabbruch vor allem mit Blick auf die Zukunft steigen kann, falls der See sich vergrössern würde. Eine detailliertere Evaluation bezüglich möglichem Eis-Felsabbruchvolumen und möglicher Ausbruchsgefährdung des Gorelniksees wird daher empfohlen, falls der See wieder an Volumen gewinnen würde. Momentan wird seine Lage hinter einem knapp 40 Meter hohen Moränenwall (eigene Messungen), sein geringes Volumen sowie die momentane Tendenz zur Verkleinerung als ungefährlich für einen Ausbruch durch einen Eis-Felsabbruch beurteilt.

Auch beim See unterhalb des Peak Sovetov können die Modellierungsergebnisse in Bezug auf die Faktoren von Huggel et al. (2004) evaluiert werden (Abb. 25). Werden die Modellierungsergebnisse bezüglich dem Einfluss der Richtungsänderung betrachtet, so können die Modellläufe, welche ein

Umfließen der Rampenzone und seitliches Treffen des Sees angeben, als weniger wahrscheinlich eingestuft werden. Das Gelände zwischen möglichen Eis-Felsabbruchorten und dem See besteht aus Gletschereis, das im unteren Bereich teilweise Schuttbedeckt ist. Unterhalb der Steilhänge besitzt das Gletschereis eine geringere Neigung ( $6^{\circ}$ - $11^{\circ}$ ) über eine Strecke zwischen 200 und 250 Meter bis zum Rampenbereich oberhalb des Sees. Vor dem See flacht die Gletscherzunge nochmals stark ab. Entlang des oberen Teils des Rampenbereiches ziehen sich viele Spalten über einen schmalen Bereich. Die Rauigkeit ist daher eher tief zu beurteilen und kann die Wahrscheinlichkeit für einen Seeimpakt durch einen Eis-Felsabbruch erhöhen. Der flachere Bereich wird jedoch eine bestimmende Komponente sein, ob ein Eisabbruch den See erreicht oder nicht. Der Volumenzunahme wird hier wenig Potential zugeschrieben, während eine Volumenabnahme durch die flachere Topographie im oberen Bereich durchaus möglich ist. Eine Schuttansammlung im flacheren Bereich, welche auf einen vergangenen Steinschlag hindeutet, kann ein Indiz für eine mögliche instabilere Stelle und mögliches Abbruchgebiet sein. Als Fazit wird hier geschlossen, dass potentiell ein Impakt durch eine Eislawine oder einen Eis-Felsabbruch je nach Dimension der Massenbewegung und Lage des Abbruches in der Falllinie zum See oder seitlich möglich ist. Ist das Volumen genügend gross, vermag die Energie möglicherweise gross genug sein, dass der flachere Bereich und die zerklüftete Rampenzone des Gletschers überwunden werden können und der Impakt in der Falllinie zum Ausfluss mitten in den See passiert. Die Gefahr wird vor allem mit Blick auf die Zukunft als wahrscheinlicher eingestuft. Eine Vergrößerung des Sees in den nächsten Jahren ist sehr wahrscheinlich. Ein mögliches Wachstum des Sees würde dazu führen, dass ein grösserer Teil des gefährdeten Bereichs im See liegen würde und so die Anfälligkeit auf einen Ausbruch durch einen Eis-Felsabbruch erhöht ist. Während des Aufenthaltes vor Ort wurden täglich Eis-Steinschläge aus der Zone neben dem Hängegletscher beim Gorelniksee beobachtet. Dies kann Indiz dafür sein, dass die eis- und permafrosthaltigen Hänge oberhalb des Gorelniksees Instabilitäten entwickeln. Auch die Ergebnisse zur Klimaveränderung, Permafrostlage und Gletscherentwicklung im Gebiet (Kapitel 1.2, 1.3 und 1.4) lassen vermuten, dass ein Eis-Felsabbruch vor allem mit Blick auf die Zukunft wahrscheinlicher wird. Obwohl aus den potentiellen Eis-Felsabbruchgebieten oberhalb des See Sovetov keine Eis- oder Steinschläge während der Feldarbeit beobachtet wurden, kann aufgrund der vergleichbaren Lage zum Hängegletscher beim Gorelniksee darauf geschlossen werden, dass, mit dem Temperaturanstieg, das Eis und das permafrosthaltige, verwitterte Gestein an den steilen Hängen instabiler werden.



Abbildung 24: Potentielle Eisabbruchgebiete (rote Markierung) oberhalb des Gorelniksees und Geländecharakteristik zwischen Eisabbruch und See. (eigene Aufnahme)



Abbildung 25: Potentielle Eis-Felsabbruchgebiete (rote Markierung) oberhalb des See Sovetov und Geländecharakteristik zwischen dem Eis-Felsabbruch und See.(eigene Aufnahme)

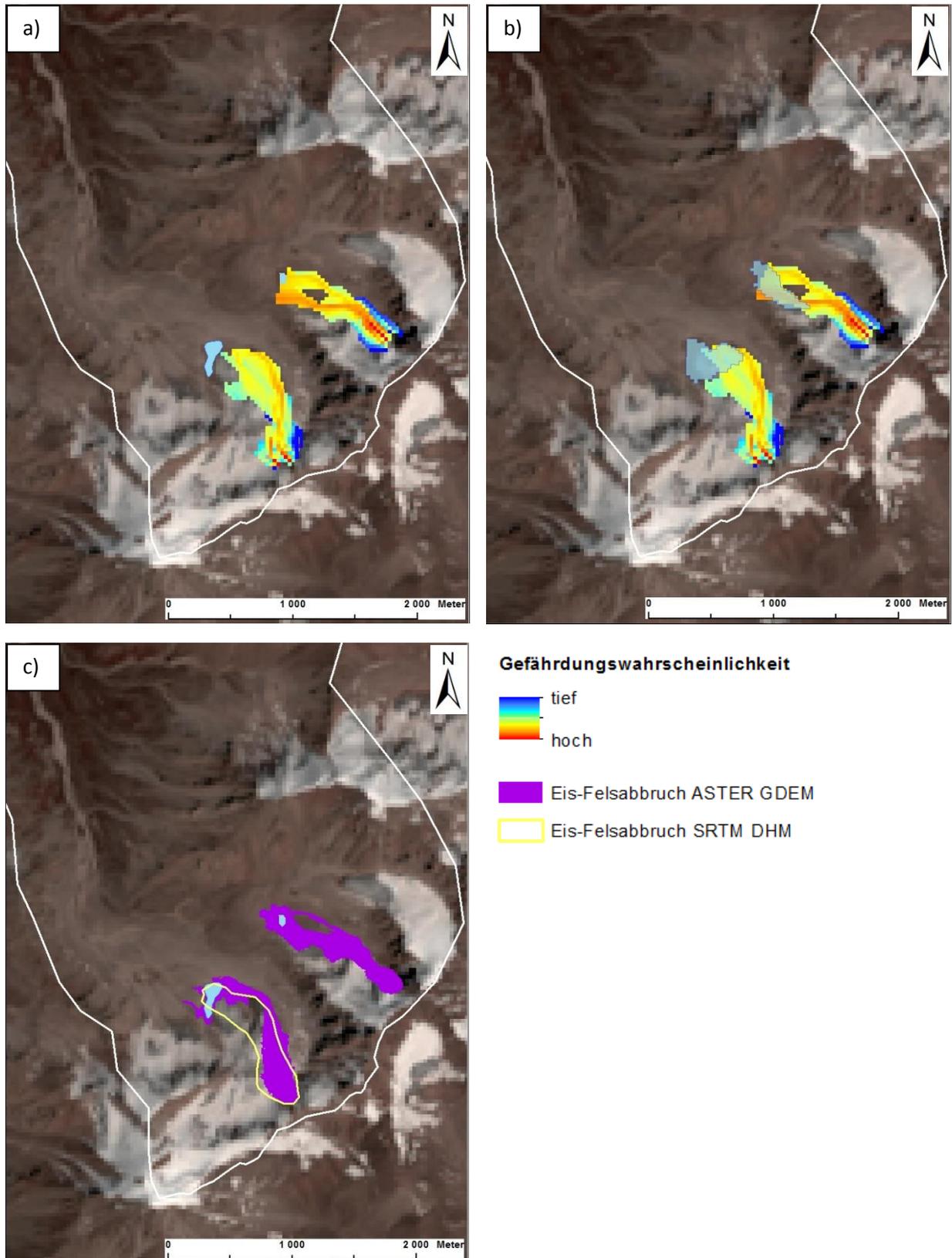


Abbildung 26: Modellergebnisse mit MSF und RAMMS für die Bewegungswege potentieller Eis-Felsabbüche. a) Bewegungsweg mit dem MSF Modell für die aktuelle Situation für beide Seen b) Bewegungsweg mit dem MSF Modell für die zukünftige Situation für beide Seen c) Bewegungsweg mit dem ASTER GDEM (violett) für beide Seen gegenüber dem Resultat mit dem SRTM DHM (gelber Umriss) gestellt für den See Sovetov.

#### 7.4 Qualitative Abschätzung der Ausbruchgefährdung

Die Bewertung der Indikatoren (Tab. 17) konnte bis auf die Abschätzung von Eis im Damm durchgeführt werden. Für die aktuelle Situation beim See Sovetov und mit Bezug auf die mögliche zukünftige Situation erhielt die Mehrheit der Indikatoren den Wert 2 oder 3. Für die aktuelle Situation beim Gorelniksee erhielt die Mehrheit der Indikatoren eine Bewertung von 1 oder 2. Die Bewertung weist eine Unsicherheit von + 6 Punkten aufgrund fehlender Daten und potentieller Systemveränderung auf.

Tabelle 17: Auswertung der qualitativen Abschätzung der Ausbruchgefährdung der Seen Sovetov (a) und Gorelnik (b).

| a) | Schlüsselkomponente               | Indikator   | Klassierung   | Ausbruchgefährdung          | Wert |
|----|-----------------------------------|---|---|-----------------------------|------|
|    | <b>Dammtyp</b>                    | Eis<br>Moräne<br>Fels                                     |   | hoch<br>mittel-hoch<br>tief | 2    |
|    | <b>Eisabbruch</b>                 | Gletscherneigung  | gross / mittel / tief   | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    |                                   | Temperaturregime<br>Gletscher                             | temperiert/polythermal/kalt   | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    |                                   | Entwicklung von<br>Eisspalten                             | Eisspalten und Eisfall<br>vorhanden / Eisspalten<br>vorhanden / keine<br>Eisspalten | hoch/mittel/tief            | 2    |
|    | <b>Überlauf</b>                   | Freeboard   | <5m / 5-15m / >15m  | hoch/mittel/tief            | 3    |
|    |                                   | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe                       | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    | <b>Piping</b>                     | Eisvorkommen im<br>Damm                                   | ja / möglich / nein   | hoch/mittel/mittel-<br>tief | 2    |
|    |                                   | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe                   | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                                   | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe                       | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    | <b>Gletscherbewegung</b>          | Distanz Gletscher zu<br>See                               | 0 / 0-500 / >500  | hoch/mittel/tief            | 3    |
|    | <b>Dammstabilität</b>             | Eisvorkommen im<br>Damm                                   | ja / nein   | hoch/mittel-tief            | 0    |
|    |                                   | Distale Hangneigung<br>des Dammes                         | >20° / 3-20° / <3°  | hoch/mittel/tief            | 2    |
|    |                                   | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe                   | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                                   | Dammmaterial  | konsolidiert / unkonsolidiert   | tief / mittel               | 2    |
|    | <b>Meteorologische<br/>Events</b> | Häufigkeit hohe<br>Temperaturen und<br>Starkniederschläge | häufig<br>sporadisch<br>selten  | hoch<br>mittel<br>tief      | 2    |

|                               |  |   |                        |              |
|-------------------------------|--|---|------------------------|--------------|
| <b>Seismische Aktivitäten</b> | Erdbebenanfälligkeit der Region            | häufig / grosse Stärke<br>sporadisch / mittlere Stärke<br>selten / tiefe Stärke           | hoch<br>mittel<br>tief | 1            |
| <b>Seeimpakt</b>              | Eislawine/Eisabbruch/<br>Felssturz/Murgang | Häufig / grosses Volumen<br>sporadisch / mittleres<br>Volumen<br>selten / kleines Volumen | hoch<br>mittel<br>tief | 1            |
|                               |  |   |                        | <b>30-34</b> |

| b) | Schlüsselkomponente      | Indikator                               | Klassierung   | Ausbruchsgefahr             | Wert |
|----|--------------------------|---|---|-----------------------------|------|
|    | <b>Dammtyp</b>           | Eis<br>Moräne<br>Fels                   |   | hoch<br>mittel-hoch<br>tief | 2    |
|    | <b>Eisabbruch</b>        | Gletscherneigung                        | gross / mittel / tief   | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    |                          | Temperaturregime<br>Gletscher           | temperiert/polythermal/kalt   | hoch/mittel/tief            | 2-3  |
|    |                          | Entwicklung von<br>Eisspalten           | Eisspalten und Eisfall<br>vorhanden / Eisspalten<br>vorhanden / keine<br>Eisspalten | hoch/mittel/tief            | 3    |
|    | <b>Überlauf</b>          | Freeboard                               | <5m / 5-15m / >15m  | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                          | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe     | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    | <b>Piping</b>            | Eisvorkommen im<br>Damm                 | ja / möglich / nein   | hoch/mittel/mittel-<br>tief | 2    |
|    |                          | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                          | Verhältnis Freeboard<br>zu Dammhöhe     | tief / mittel / hoch  | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    | <b>Gletscherbewegung</b> | Distanz Gletscher zu<br>See             | 0 / 0-500 / >500  | hoch/mittel/tief            | 3    |
|    | <b>Dammstabilität</b>    | Eisvorkommen im<br>Damm                 | ja / nein   | hoch/mittel-tief            | 0    |
|    |                          | Distale Hangneigung<br>des Dammes       | >20° / 3-20° / <3°  | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                          | Verhältnis<br>Dammbreite zu<br>Dammhöhe | klein / mittel / gross<br><1 / 1-2 / >2   | hoch/mittel/tief            | 1    |
|    |                          | Dammmaterial                            | konsolidiert / unkonsolidiert   | tief / mittel               | 2    |

|                               |   |  |                        |              |
|-------------------------------|---|--|------------------------|--------------|
| <b>Meteorologische Events</b> | Häufigkeit hohe Temperaturen und Starkniederschläge | häufig<br>sporadisch<br>selten   | hoch<br>mittel<br>tief | 2            |
| <b>Seismische Aktivitäten</b> | Erdbebenanfälligkeit der Region                     | häufig / grosse Stärke<br>sporadisch / mittlere Stärke<br>selten / tiefe Stärke        | hoch<br>mittel<br>tief | 1            |
| <b>Seeimpakt</b>              | Eislawine/Eisabbruch/<br>Felssturz/Murgang          | Häufig / grosses Volumen<br>sporadisch / mittleres Volumen<br>selten / kleines Volumen | hoch<br>mittel<br>tief | 1            |
|                               |   |  |                        | <b>26-28</b> |

|       | Tief  |       | Mittel |    |       | hoch  |       |
|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|
| Wert  | 1     |       | 2      |    |       | 3     |       |
| Summe | 17-23 | 23-29 | 29-33  | 34 | 35-40 | 40-45 | 45-51 |

Die erhaltene Summe für den See Sovetov beträgt 30-34. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit kann der Wert maximal 40 erreichen. Die Ausbruchgefährdung wird somit in Übereinstimmung mit den Resultaten von Bolch et al. (2011) als mittelmässig eingestuft. Mit dem potentiellen Wert von 40 könnte jedoch die Ausbruchgefährdung sogar bei mittel-hoch positioniert werden.

Für den Gorelniksee wurde eine Punktzahl von 26-28 erhalten. Unter der Berücksichtigung der Unsicherheiten kann der Wert maximal 34 erreichen. Die Ausbruchgefährdung kann momentan als eher tief eingestuft werden. Falls der See wieder an Volumen gewinnt, könnte die Ausbruchgefährdung als mittelmässig eingestuft werden.

### 7.5 Empirische Berechnung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches

Die Gesamtlänge der Strecke vom See bis zum Murenschutzdamm beträgt knapp 15 km, bis zum Zusammenfluss Prochodnaja knapp 12 km (Luftdistanz). Das Höhengefälle zwischen See und Murenschutzdamm beträgt 2240 m, bis zum Zusammenfluss Prochodnaja 2080 m. Dies ergibt mit der Formel (6.1) ein Pauschalgefälle von 8°-9° beziehungsweise eine Unterschätzung von 3.8 km bei der Annahme von 11° für das Ereignis 1977. Wenn die Länge und das Höhengefälle ab der Murgangrinne betrachtet werden, wo sich zumindest beim Ereignis 1977 der eigentliche Murgang gebildet hat, so ergibt sich eine Neigung von 10° beziehungsweise eine Unterschätzung von 1.3 km bei der Annahme von 11°. Für das Ereignis 2006 ergibt sich eine notwendige Neigung von 9°-10° beziehungsweise die Strecke wird um 1.7 km unterschätzt.

Mit der Formel (6.2) von Rickenmann (1999) ergibt sich eine Reichweite für das Ereignis 1977 von 5469 m – 6756 m, je nach Wahl des Anrissortes (Murgangrinne oder See). Für das Ereignis 2006 ergibt sich eine Reichweite von 8485 m. Die Reichweite wird also stark unterschätzt mit den Ausgangswerten. Die tatsächliche Reichweite wird über Rickenmann (1999) erst angenähert, wenn ein Volumen

miteinbezogen wird, das ungefähr dem insgesamt abgelagerten Volumen entspricht. Mergili et al. (2011) kommen in ihrem Studiengebiet auf ähnliche Ergebnisse. Die Volumenzunahme in deren Studie beträgt ungefähr das 6 fache. Um die Reichweite des Ereignisses 1977 zu erzielen, wäre aber sogar eine Skalierung um das 32-133 fache nötig. Hussin et al. (2012) zeigen zwar in ihrer Studie, dass in Gebieten mit hoher Sedimentverfügbarkeit die Skalierung das 10 bis 50 fache erreichen kann, dennoch ist die Bandbreite der nötigen Skalierung für das Ereignis 1977 zweifelhaft und kann durch den mathematischen Hintergrund der Formel begründet werden. Dieser zeigt auch, dass die Formel ihre Brauchbarkeit für lange Distanzen verliert (Abb. 27). Der Ansatz von Huggel et al. (2003) erweist sich als robuster, auch wenn dieser die Ereignisse 1977 und 2006 eher unterschätzt. Wobei hier, bei Berücksichtigung der Prozesse, eine relativ gute Abschätzung erzielt wird.

Die Berechnung der maximalen Reichweite des aktuellen und zukünftigen Seevolumens sowie den erstellten Szenarien für Murgangvolumina mit der Formel von Rickenmann (1999) zeigen, dass die maximale Reichweite zwischen dem Zusammenfluss mit dem Flüssen Ajusai und Prochodnaja liegt. Nur das Szenario mit 9'000'000 m<sup>3</sup> reicht bis vor den Murenschutzdamm.

Die beiden Ansätze können nur als Annäherung verstanden werden, da die Charakteristik eines GLOFS sich zur Charakteristik eines normalen Murganges unterscheiden kann. Ausserdem basiert die Formel von Rickenmann (1999) mehrheitlich auf Daten aus den Schweizer Alpen und einigen Ereignissen aus anderen Regionen der Welt. Empirisch-statistisch abgeleitete Beziehungen können ausserhalb der evaluierten Region von der Realität stark abweichende Werte erzeugen. Das Ergebnis für das Ereignis 1977 lässt darauf hindeuten. Der empfohlene minimale Neigungswert für granulare Murgänge wurde ebenfalls aus Daten aus den Schweizer Alpen abgeleitet. Der Ansatz von Huggel et al. (2003) kann die Reichweite unter Annahme von granularen Murgängen im Vergleich zu den berechneten Werten für 1977 unterschätzen.

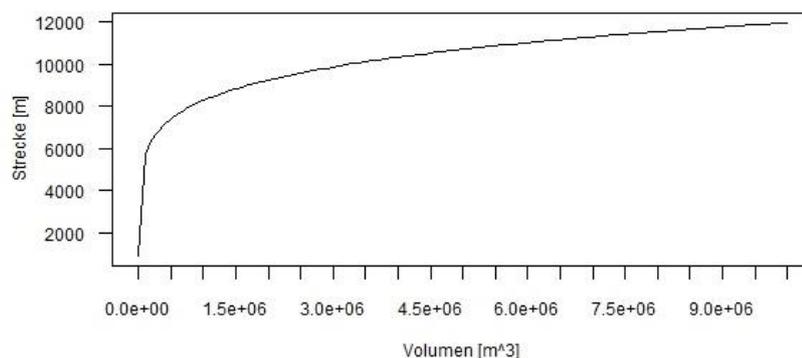


Abbildung 27: Verhalten der Formel ( $1.9 \cdot V^{0.16} \cdot dH^{0.83}$ ) von Rickenmann (1999) über die Distanz für die Abschätzung der Reichweite eines Murganges.

## 7.6 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches mit RAMMS

Den Ergebnissen und Auswertungen muss vorausgeschickt werden, dass sich zeigte, dass RAMMS generell Mühe hatte, reale Höhen zu modellieren. Viele Bereiche erreichten maximal 1 Meter. Aufgrund der beschriebenen Murgänge im Gebiet und den beobachteten Erosionsspuren (Anhang 1 und 2) muss aber mit grösseren Höhen gerechnet werden. Wegen fehlenden Angaben zu Geschwindigkeitswerten und der hohen Variabilität über die gesamte Länge, werden diese in der folgenden Analyse nicht vertieft behandelt. Diese Gründe führen dazu, dass die Resultate mehrheitlich qualitativen als quantitativen Charakter erhalten. Die Abbildungen 28-34 geben einen Überblick zu dem nachfolgend Besprochenen.

### 7.6.1 Ausbruch ab der Murgangrinne

Die Modellläufe mit dem SRTM DHM und ASTER GDEM im Vergleich ergeben, dass beide die gleichen Tendenzen zeigen. Die Modellläufe mit dem SRTM DHM zeigen generell gegenüber den Modellläufen mit dem ASTER GDEM eine grössere Reichweite (Abb. 33). Alle Modellläufe mit dem SRTM DHM zeigen ein Überfliessen des Murenschutzdammes an. Die Resultate mit dem ASTER GDEM variieren stärker. Je nach Volumen und Werte der Reibungskoeffizienten wird ein Aufstauen des Murganges vor dem Murenschutzdamm oder ein Überfliessen des Murenschutzdammes angezeigt. Bei allen Szenarien wird mindestens der Bereich zwischen dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und dem Murenschutzdamm erreicht. Auf der Höhe des Wasserkraftwerkes wird eine Inundation des gesamten Gebietes angezeigt. Beim Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja kommt es zum Aufstauen des Murganges und verzögertem Weiterfliessen. An verschiedenen Stellen kommt es zu starkem seitlichem Ausscheren des modellierten Murganges. Das Ausmass des Ausscherens variiert dabei in Abhängigkeit des Murgangvolumens. Je grösser das Volumen, desto stärker das Ausscheren. Dieses Ausscheren wird hier der Qualität der Höhenmodelle zugeschrieben. Für diese Bereiche wäre aber eine Feldüberprüfung der Plausibilität empfehlenswert.

### 7.6.2 Ausbruch ab dem See

Die Modellierungsergebnisse mit allen Höhenmodellen zeigen die gleiche Tendenz mit unterschiedlich starker Ausprägung in Abhängigkeit der Auflösung und Qualität der zugrunde liegenden Fernerkundungsdaten, sowie der Auflösung der Höhenmodelle (Abb. 28, 30, 33). Ein Ausbruch des Sees führt zu einem ersten Aufstauen im Seebecken des ehemaligen Moränensees unterhalb des aktuellen Sees (Abb.34). Ab einer Höhe von 3-4 Metern kommt es zu einem weiterfliessen aus der noch bestehenden Abflussrinne im relikten Moränendamm. Im flacheren Bereich vor der Murgangrinne kommt es zu divergierenderem Fliessen und zur Aufstautendenz direkt vor der Murgangrinne. Dort kann bei Betrachtung von Bildaufnahmen von der Feldbegehung eine wallartige Erhöhung erkannt werden, welche zu einer starken Umleitung des Bachgerinnes führt. Auffällig ist, dass das Modell das Weiterfliessen auf der „falschen“ Seite dieses Walles forciert. Das heisst, die Seite wo das Bachgerinne weiterführt wird später überflossen. Dies wird als Fehler im zugrunde liegenden Höhenmodell interpretiert und ein Aufstauen in der modellierten Ausprägung als eher unwahrscheinlich angesehen.

Die Resultate im obere Bereich des Untersuchungsgebietes zeigen, dass der Bereich des ehemaligen Moränensees eine entscheidende Rolle in der Gefährdungsabschätzung spielen kann. Zwei mögliche Szenarien werden hier in Betracht gezogen:

- Die Ablagerung des Materials durch den Seeausbruch im Seebecken des ehemaligen Sees und das Aufstauen des nachfliessenden Wassers und Materials. Bei genügend grossem Volumen und Wassersättigung kommt es zu einem erneuten Ausbruch ab diesem Bereich und einer Ablagerung im flacheren Bereich vor der Murgangrinne. In Abhängigkeit des Ausbruchtriggers und der Zeitverzögerung bis zum erneuten Ausbruch ab dem tieferen Niveau, könnte das Wasser einen weiteren Murgang in der Murgangrinne auslösen.
- Die Ablagerung des Materials durch den Seeausbruch im Seebecken des ehemaligen Sees, jedoch kein Aufstauen und dosierteres Abfliessen des Wassers oder Murgangs. Falls der Ausbruch durch intensive Niederschläge ausgelöst wurde und die Bodenfeuchte im gesamten Gebiet hoch ist, kann ein weiterer Murgang in der Murgangrinne ausgelöst werden, der jedoch vermutlich ein kleineres Volumen und eine geringere Reichweite aufweisen könnte.

### 7.6.3 Unsicherheiten

Wegen fehlenden Angaben zu Geschwindigkeitswerten und der hohen Variabilität über die gesamte Länge, wurden diese nicht für die Auswertung der Resultate miteinbezogen. Die Höhen zeigten im Gegensatz zu den Geschwindigkeiten ein etwas differenzierteres Bild. Werden die Resultate auf die Sensitivität verschiedener Ausbruchsvolumina, Wertepaare der Reibungskoeffizienten und Höhenmodelle analysiert (Abb. 28-31), zeigen sich drei konstant auffällige Bereiche, welche gegenüber den anderen Bereichen grössere Unsicherheiten aufweisen. Dies sind die steile Murgangrinne, der Bereich unterhalb des Wasserkraftwerkes und der Bereich um den Murenschutzdamm. Der Bereich, in dem die Reibungsparameter konstant gehalten wurden, zeigt erwartungsgemäss geringe Abweichungen zwischen den Modellläufen. Die grossen Kalibrationsschwierigkeiten im oberen Teil führten dort ebenfalls zu teilweise hoher Variabilität der Resultate und somit zu Unsicherheiten.

Werden die Modellresultate mit den realen Gegebenheiten kombiniert, lassen sich folgende Aussagen machen:

- Gebiete mit Dimensionen unter der Auflösung der für die Höhenmodelle zugrunde liegenden Fernerkundungsdaten sind unsicherer zwischen den Modellläufen mit dem ASTER GDEM und SRTM DHM. Je tiefer die Auflösung, desto einfacher werden feinere Strukturen überflossen, da diese nicht mehr korrekt abgebildet sind. Der Bereich vor dem Murenschutzdamm mit verbreiterem Tal und feinstrukturierterer Geomorphologie führte daher zu den grössten Unsicherheiten zwischen den Höhenmodellen. Daraus folgt, dass die maximale Reichweite der SRTM DHM Modellläufe generell grösser ist als bei den Modellläufen mit dem ASTER GDEM.
- Mit der Erkenntnis, dass RAMMS generell die Murganghöhen unterschätzt und das Wasserkraftwerk von einem ungefähr 10 Meter hohen seitlichen Murenschutzwall geschützt wird, lassen die Resultate im Bereich des Wasserkraftwerkes darauf schliessen, dass die Gegebenheiten dort in den Höhenmodellen nicht korrekt abgebildet werden können (vgl. auch Abb. 14) und es dort daher zum Überfliessen des Wasserkraftwerkes kommt. Es wird hier als

unsicher beurteilt, ob ein Murgang am oberen Beginn des Murenschutzwalles die Struktur überwinden und das dahinter liegende Gebiet überfließen kann.

- Die Unsicherheiten in der steilen Murgangrinne lassen sich auf die Wahl der Wertepaare der Reibungskoeffizienten zurückführen.
- Die Modellläufe zeigen vor allem bei einem sechsfachen Ausbruchsvolumen ein Überfließen des Murenschutzdammes an. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in der Kalibration der Reibungskoeffizienten und der dadurch hohen Variabilität der Resultate sowie der Geomorphologie im Talbereich vor dem Damm, wird ein Überfließen stark angezweifelt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die gewählten Reibungsparameter das Vorwärtkommen des Murganges in diesem Bereich gegenüber der realen Geomorphologie und Topographie zu stark forciert haben, zumal die Höhenmodelle eine tiefe Auflösung aufweisen und das Vorwärtkommen ebenfalls forcieren können.
- Die lokalen Extremwerte im Bereich der Kumbelbrücke zeigen, dass dort die Topographie in den Höhenmodellen von der Realität stark abweicht (vgl. auch Abb. 14), neben dem dass es sich um Oberflächenmodelle handelt.
- Inwiefern ein Murgang bis zur Murgangrinne gelangt oder ob es eher zu einem Szenario wie 1977 kommt, muss hier offen gelassen werden.
- Die Rolle des Seebeckens des ehemaligen Sees kann die Folgen eines Seeausbruches wesentlich beeinflussen. Auf welche Weise, kann aus den Modellresulten als Tendenz abgeleitet werden, erlauben jedoch keine genauere Aussage.
- Wird die Sensitivität des Ausbruchsortes auf die Höhenmodelle getestet, so zeigte sich, dass die Modellierung mit dem ASTER GDEM sensitiver auf die Wahl des Ausbruchsortes reagierte als mit dem SRTM DHM. Die mögliche maximale Reichweite zeigt daher eine gewisse Abhängigkeit von der Wahl des Höhenmodelles (Abb. 32).

#### 7.6.4 Gefährdungspotential

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass ein Murgang eine maximale Reichweite bis über den Murenschutzdamm in die Stadt Almaty erreichen kann. Werden die zuvor erwähnten Unsicherheiten berücksichtigt, so liegt die maximale Reichweite zwischen dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und dem Murenschutzdamm.

Die Gegenüberstellung der teilweise modellierten Murgänge ab dem See unter sonst gleichen Bedingungen wie bei den Murgängen ab der Murgangrinne zeigen, dass auch ein Murgang ab dem See das Potential hat, den Damm zu erreichen und sogar zu überfließen. Dies aber erst ab einem projizierten sechsfachen Seevolumen. Beim Vergleich von einem projizierten dreifachen Volumen zeigt sich ein grösserer Unterschied. Ab der Murgangrinne erreicht der Murgang den Murenschutzdamm, ab dem See staut sich der Murgang beim Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja. Es wird daher einen Toleranzbereich als mögliche Reichweite zwischen dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und dem Murenschutzdamm als maximale Reichweite definiert.

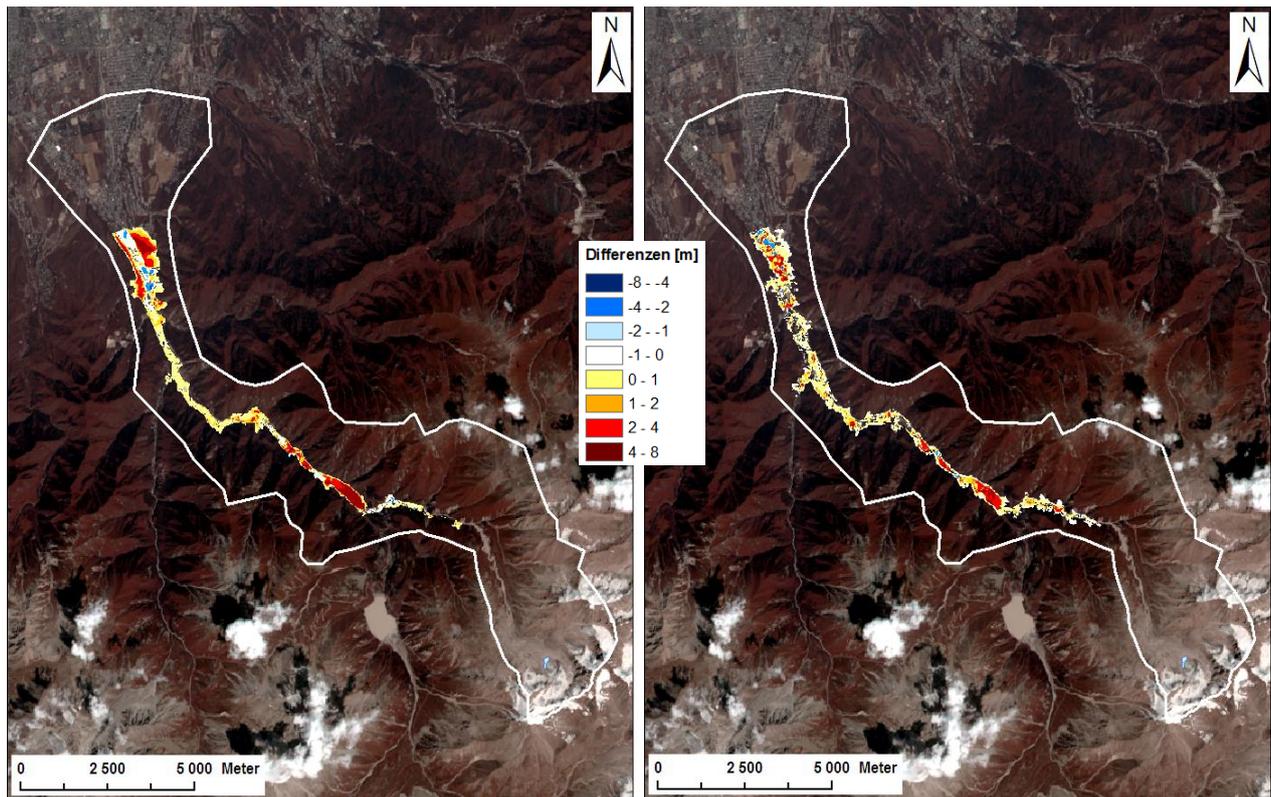


Abbildung 28: Sensitivität der Höhe auf das Volumen (Differenzen der 3fachen und 6fachen Volumina). Links: SRTM DHM; rechts: ASTER GDEM.

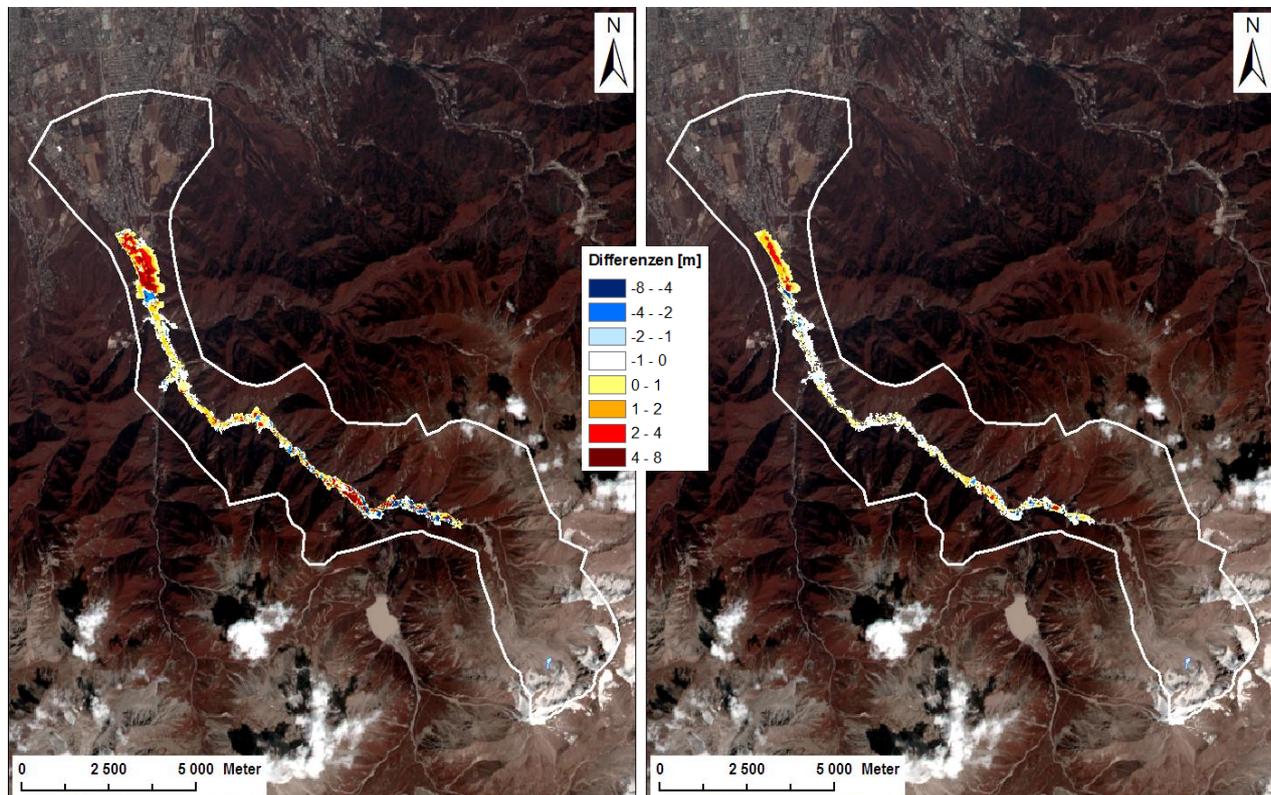


Abbildung 29: Sensitivität des Höhenmodelles auf die Höhe (Differenz der 3fachen (rechts) bzw. 6fachen Volumina (links) im SRTM DHM und ASTER GDEM).

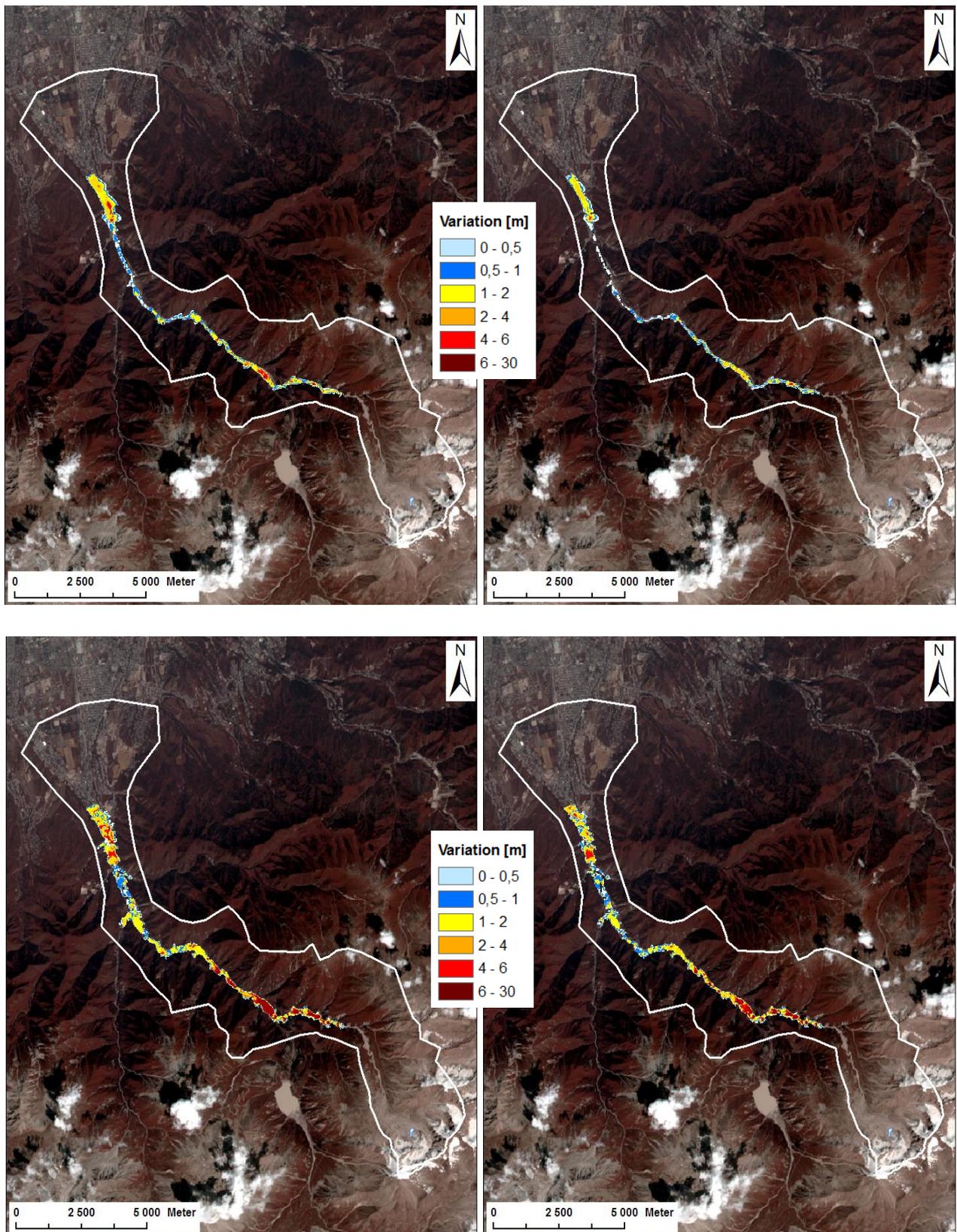


Abbildung 30: Sensitivität auf die Höhenmodelle und das Volumen. Oben: SRTM DHM mit 6 fachem (links) und 3 fachem (rechts) Volumen, Unten: ASTER GDEM mit 6 fachem (links) und 3 fachem (rechts) Volumen.

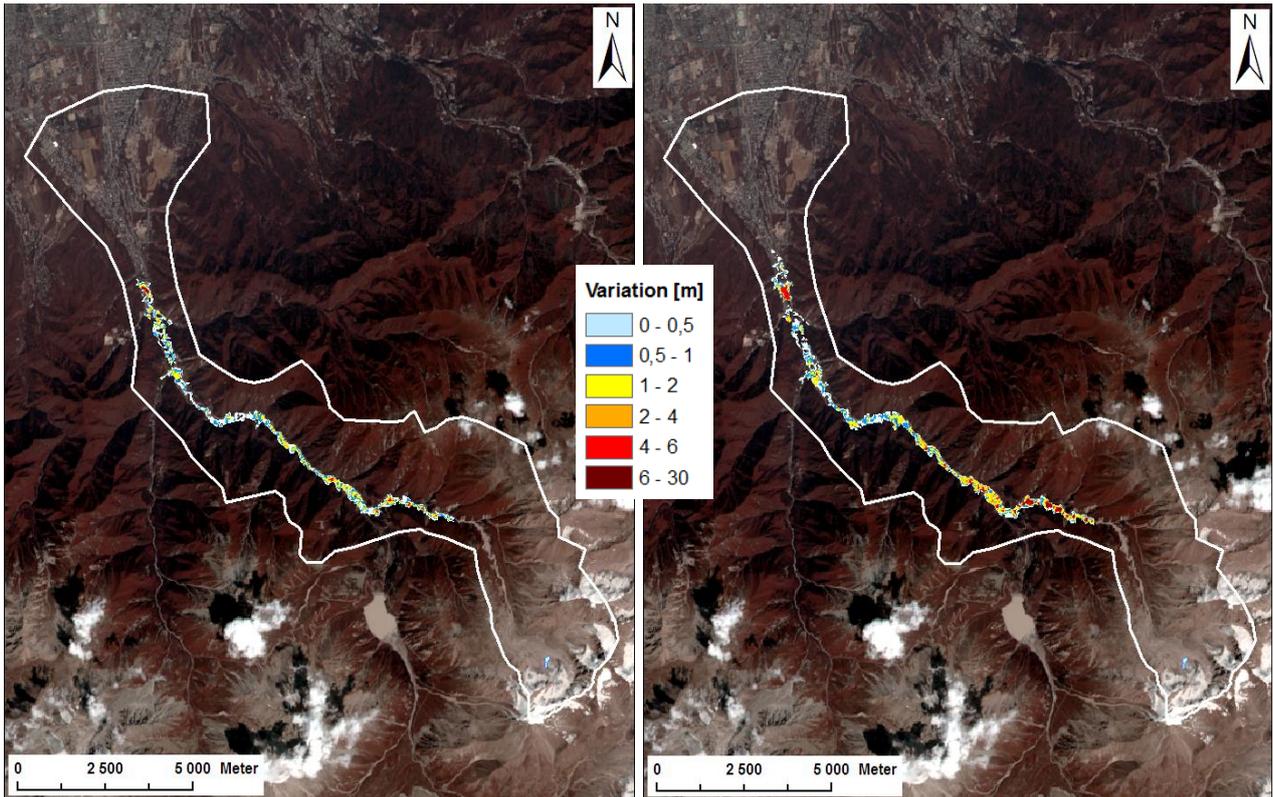


Abbildung 31: Sensitivität auf die Reibungskoeffizienten. Alle Modellläufe des ASTER GDEM für das Volumen 3fach (links) und 6fach (rechts) im Vergleich.

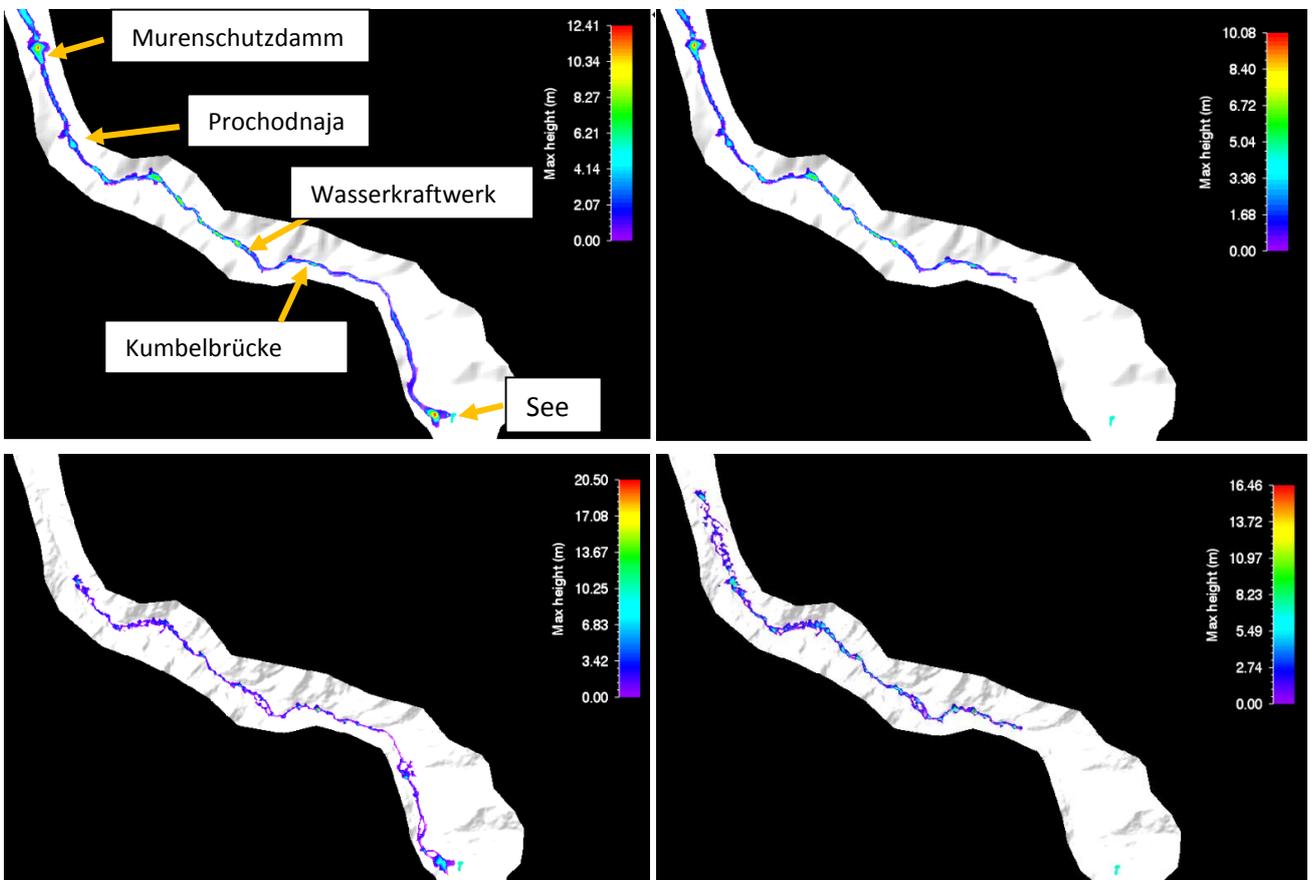


Abbildung 32: Sensitivität der Wahl des Ausbruchsortes auf die Wahl des Höhenmodelles. Oben: SRTM DHM ab See und Murgangrinne, Unten: ASTER GDEM ab See und Murgangrinne.

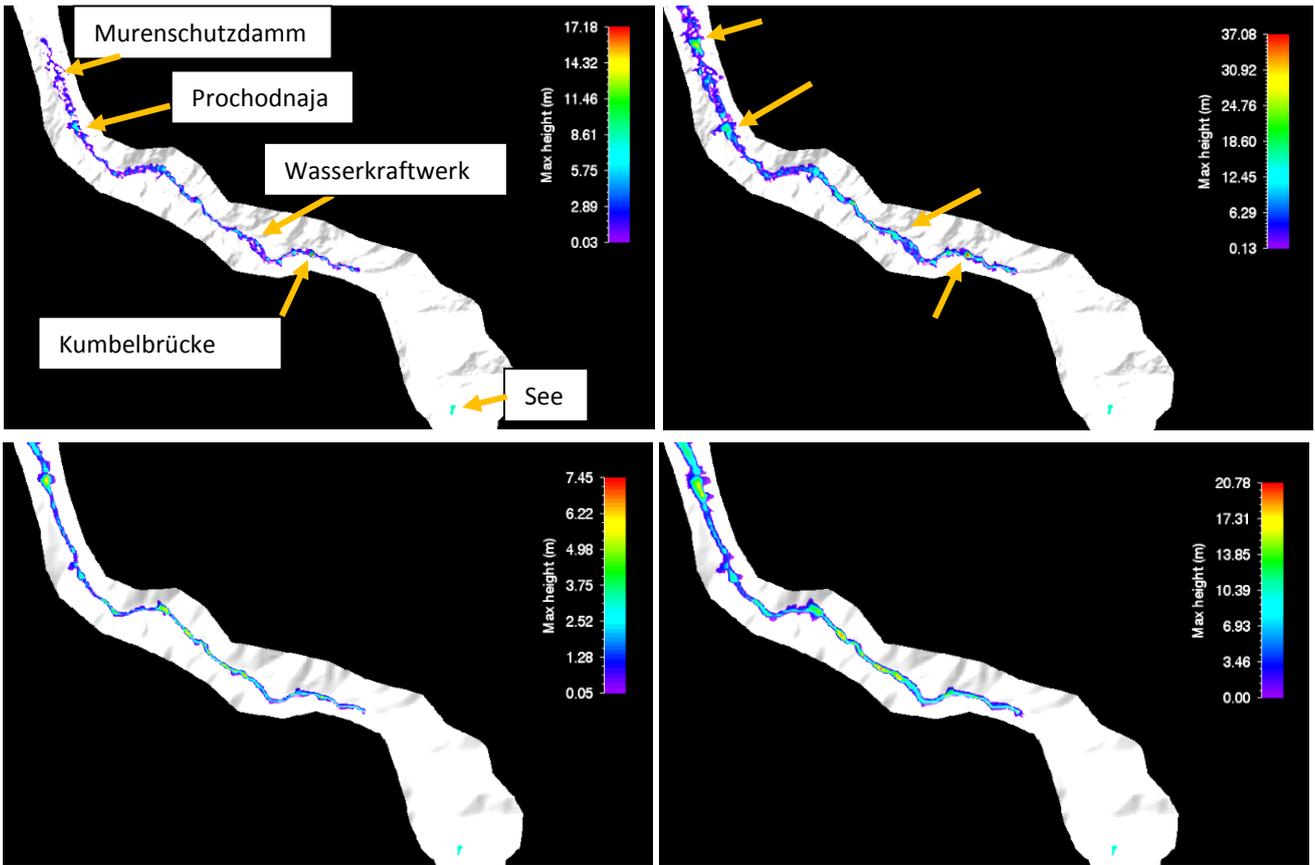


Abbildung 33: Reichweite in Abhängigkeit der Wahl des Höhenmodells bei gleichem Ausbruchsvolumen. Links: ASTER GDEM vs. SRTM DHM 3faches Volumen, rechts: ASTER GDEM vs. SRTM DHM 6fache Volumen.

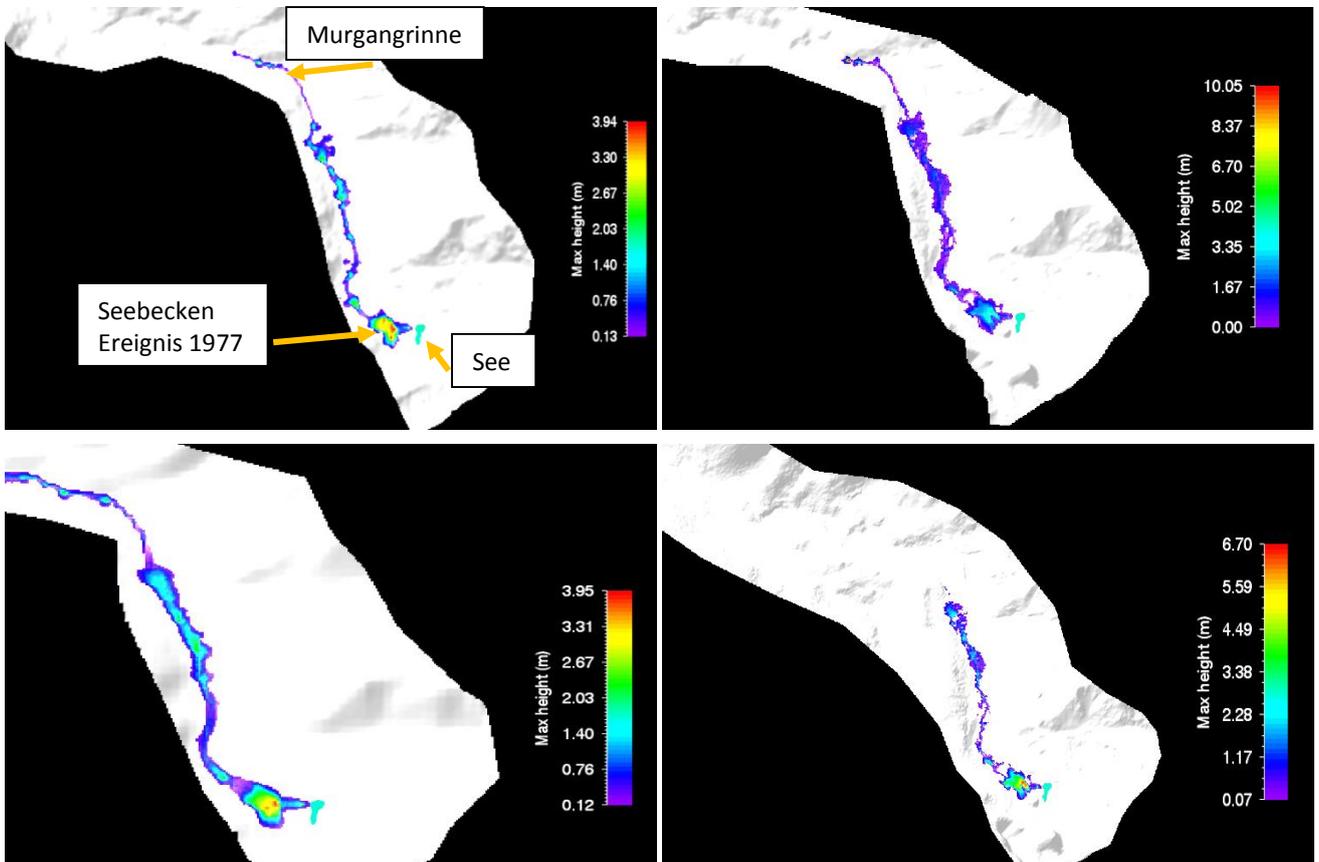


Abbildung 34: Modellergebnisse im oberen Bereich, mit ersichtlicher Aufstautendenz im Seebecken des ehemaligen Moränensees und vor der Murgangrinne. Die Tendenzen werden in allen Höhenmodellen gleich angegeben. Oben links: ASTER GDEM 20m, Oben rechts: GeoEye DHM 20m, Unten links: SRTM DHM 20m, Unten rechts: GeoEye DHM 10m.

## 7.7 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches mit MSF

### 7.7.1 Ausbruch ab dem See

Die Abbildungen 35 und 36 geben einen visuellen Überblick zu dem hier Besprochenen.

Für einen Ausbruch ab dem aktuellen See zeigt das MSF Modell mit dem Grenzwert von 11° für granulare Murgänge den Moränendamm, den mittleren Teil des oberen Kumbeltales und die steile Murgangrinne bis zum unteren Ende des Kumbeltales als mögliche betroffene Gebiete. Auffällig sind hier die längeren Unterbrüche zwischen den betroffenen Gebieten. Dies führt zur Frage, inwiefern ein Murgang das Potential hat, diese Abschnitte zu überwinden, oder ob es zur Ablagerung des Festmaterials kommt. Mit dem Grenzwert von 8° erweitert sich das Gefährdungsgebiet bis kurz vor den Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja. Im oberen Teil des Kumbeltales zeigt das Modell nur noch einen Unterbruch für betroffene Gebiete am Seebecken des ehemaligen Moränensees. Mit dem Grenzwert von 6° erweitert sich das Gefährdungsgebiet ohne Unterbrüche bis in die Stadt Almaty.

Interessant hier ist die Modellierung der Ablagerung im oberen Teil. Das Modell scheint im Becken des ehemaligen Moränensees stecken zu bleiben. Dies kann ein Hinweis sein, dass dieses Becken durchaus temporär als Retentionsbecken dienen kann. Allenfalls führt dies dazu, dass in diesem Becken neu Wasser aufgestaut wird und es später zu einem Ausbruch dieses aufgestauten Wassers kommt. Hier ist es nun Interessant die Resultate von RAMMS als Vergleich zu haben. Im Bezug auf die vorherrschende Topographie kann dieses Resultat mit folgenden Prozessen begründet werden:

Ein eher granularer Murgang würde im Seebecken des ehemaligen Moränensees direkt unterhalb des aktuellen Sees das transportierte Festmaterial ablagern und möglicherweise zu einem Rückstau des nachfließenden Wassers führen. Dies zeigt auch die Modellierung mit RAMMS an. Da die Abflussrinnen aus dem Seebecken des ehemaligen Sees immer noch intakt ist, muss damit gerechnet werden, dass bei genügend grosser Wassersättigung ein neuer Murgang aus dem Seebecken ausgelöst werden könnte, der das Festmaterial im oberen Teil des Kumbeltales ablagert. Das Wasser kann weiter in die steile Murgangrinne abfließen und dort einen weiteren Murgang auslösen. Je nach Sedimentverfügbarkeit kann die Charakteristik des Murganges zwischen granular und schlammstromartig liegen. Ein granularer Murgang würde bis zum unteren Ende des Kumbeltales fließen. Ein Murgang mit höherem Wasseranteil oder höherem Feinsedimentanteil würde möglicherweise bis ins Siedlungsgebiet reichen. Am unteren Ende des Kumbeltales führt eine Brücke über den Kumbelbach. Je nach Dimension könnte der Murgang die Brücke überfließen oder mindestens die seitlichen Brückenstützen beschädigen. Flüssigere Murgänge könnten in Abhängigkeit der Dimension im Siedlungsgebiet Schaden an der Infrastruktur, die nahe am Flussbett liegt, verursachen. Aufgrund der Möglichkeit, dass das Seebecken des ehemaligen Moränensees als Retentionsbecken wirkt, muss ein Ausbruch ab diesem Bereich für die Abschätzung betroffener Gebiet ebenfalls modelliert und miteinbezogen werden. Gleiches gilt auch für einen erneuten Ausbruch ab der Murgangrinne. Diese Resultate entsprechen den Simulationsergebnissen.

### 7.7.2 Unsicherheiten

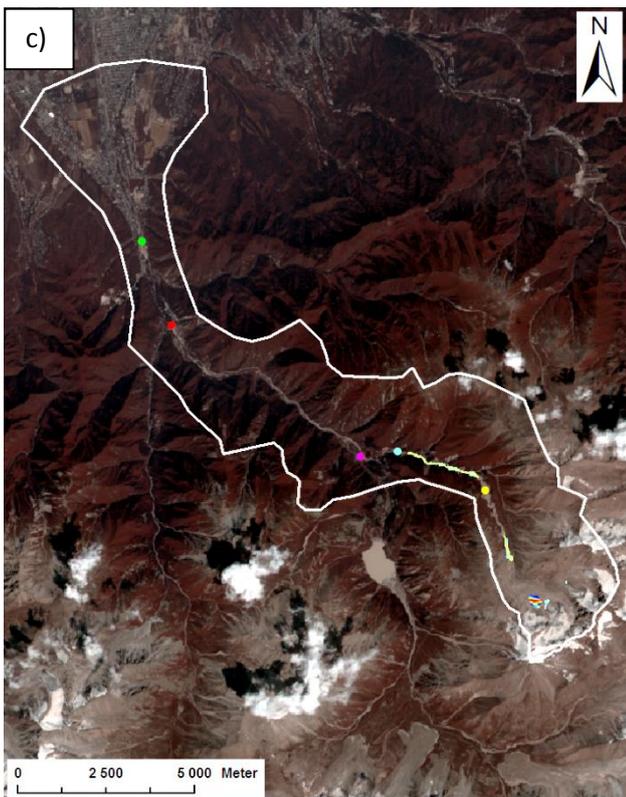
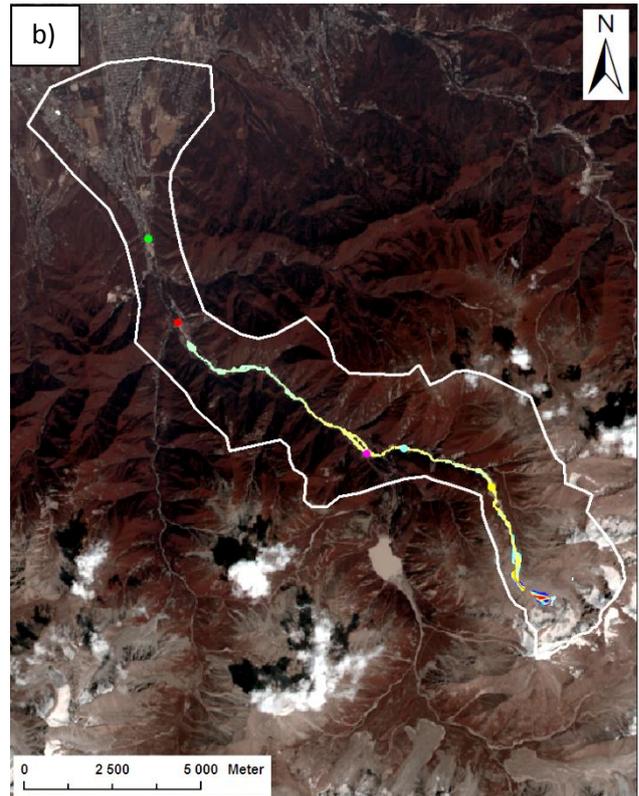
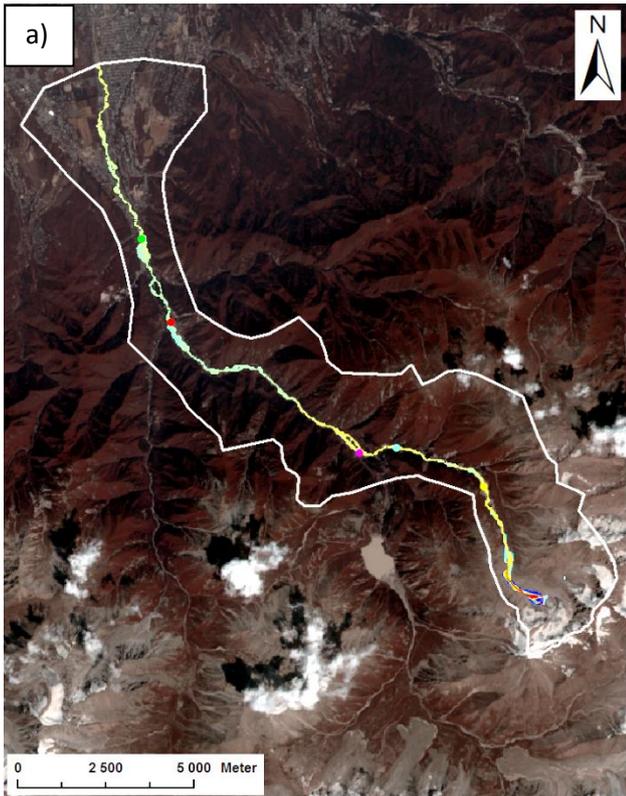
Die Unsicherheiten welche bei den Simulationsergebnissen erläutert wurden und auch für die Modellierung gelten, müssen hier mit zwei weiteren Unsicherheitsquellen ergänzt werden. Die Sensitivitätsanalyse der Empfindlichkeit der Resultate auf die Wahl der Grösse des Anrissgebietes zeigte hier keine nennenswerten Unterschiede. Daher entsprechen die Resultate für die aktuelle Situation der zukünftigen Situation und im Nachfolgenden wird nicht mehr zwischen aktueller und zukünftiger Situation differenziert.

Die Empfehlungswerte für die Murgangcharakteristik im Gebiet führen möglicherweise eher zur Unterschätzung der maximalen Reichweite eines Murganges durch einen Gletscherseeausbruch. Die kritischen Neigungswerte für das Erreichen von Siedlungsgebiet mit  $6^{\circ}$ - $8^{\circ}$  sprechen eher für „flüssigere“ Murgänge gemäss Empfehlungswerten. Es muss hier aber berücksichtigt werden, dass die Murgänge in diesem Gebiet im Gegensatz zu den Gebieten auf denen die Empfehlungswerte basieren, eine andere Dynamik aufweisen und somit eine Verschiebung der Neigungswerte bezüglich Murgangcharakteristik möglich ist.

### 7.7.3 Gefährdungspotential

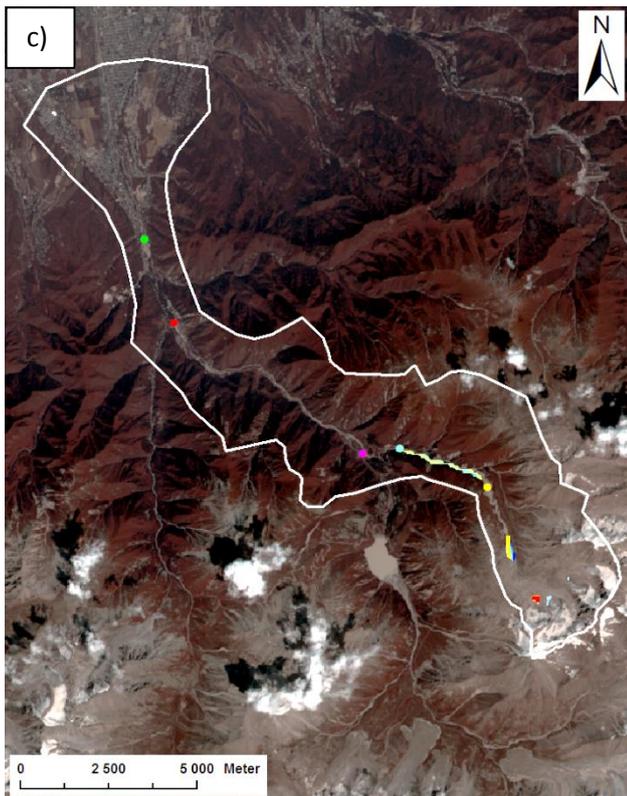
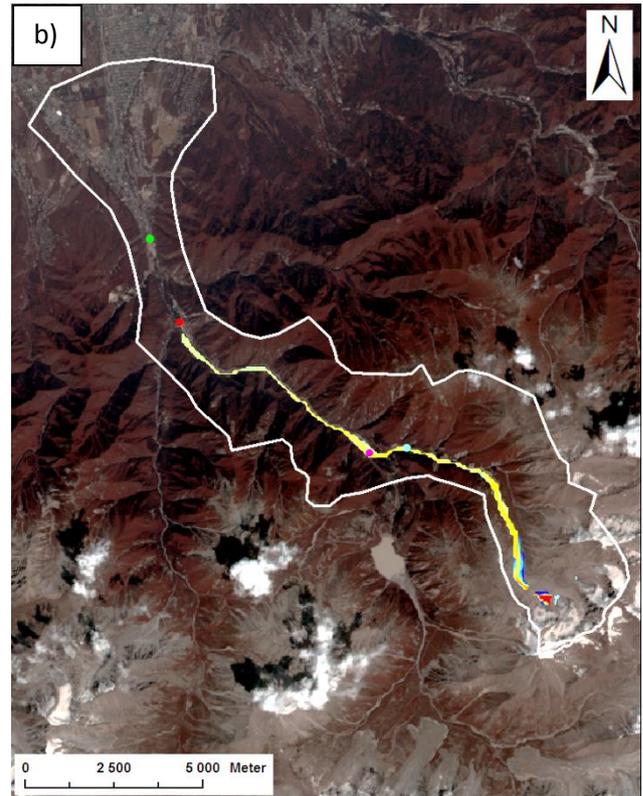
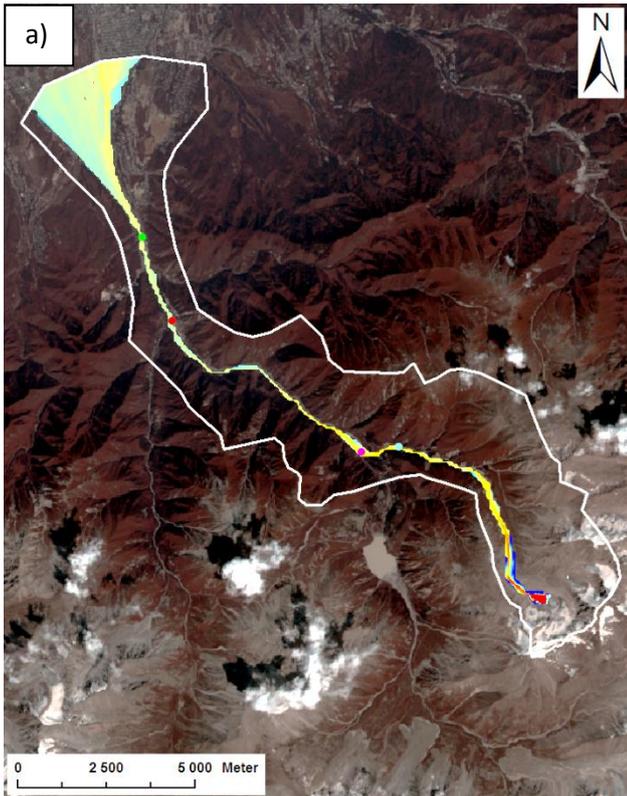
Es zeigt sich, dass die Verbindung der Resultate mit möglichen realen Prozessen ein wichtiger Schritt ist und mögliche neue Anrissgebiete miteinbezogen werden müssen, um die maximale Reichweite und die Gefährdung besser abschätzen zu können. Das Potential zur Gefährdung von Infrastruktur und Siedlungsgebiet besteht auf jeden Fall. Ein sehr granularer Murgang würde aber vermutlich bereits im Seebecken des ehemaligen Sees oder im oberen Teil des Kumbeltales ablagern und eine erneute Mobilisation von Lockermaterial ab dem Seebecken oder in der Murgangrinne wäre notwendig, damit Infrastruktur und Siedlung im unteren Teil des Untersuchungsgebietes gefährdet wären.

Die Gefährdungswahrscheinlichkeiten für die relevanten Gebiete mit Infrastruktur und Siedlung können über das MSF Modell als mittelmässig beurteilt werden. Dabei zeigt die Kumbelbrücke als Durchgangsstrecke zum grossen Almatinka See, der beliebtes Ausflugsziel ist, die höchste Gefährdungswahrscheinlichkeit beim Vergleich aller Modellläufe.



- Murenschutzdamm
  - Zusammenfluss grosser Almatinka-Fluss mit Fluss Prochodnaja
  - Wasserkraftwerk und seitlicher Murenschutzwall
  - Ende Kumbeltal
  - Anfang Murenrinne
  - Seen
- Gefährdungswahrscheinlichkeit**
- tief
  - hoch

Abbildung 35: Modellerte Reichweite und Gefährdungswahrscheinlichkeit mit dem MSF Modell ab dem See: a) 6°, b) 8°, c) 11° mit dem Höhenmodell ASTER GDEM.



- Murenschutzdamm
  - Zusammenfluss grosser Almatinka-Fluss mit Fluss Prochodnaja
  - Wasserkraftwerk und seitlicher Murenschutzwall
  - Ende Kumbeltal
  - Anfang Murenrinne
  - Seen
- Gefährdungswahrscheinlichkeit**
- tief
- hoch

Abbildung 36: Modellierte Reichweite und Gefährdungswahrscheinlichkeit mit dem MSF Modell ab dem See: a) 6°, b) 8°, c) 11° mit dem Höhenmodell SRTM DHM.

## 8. Diskussion

Die Diskussion schliesst an die bereits im Kapitel 6 und 7 erläuterten Resultate, Schwierigkeiten und Unsicherheiten an. Es sollen nochmals die Hauptschwierigkeiten fokussiert diskutiert und in die Literatur eingebettet werden sowie wichtige Erkenntnisse aufgezeigt werden.

### 8.1 Kalibration von RAMMS

Westoby et al. (2014) sieht die grössten Unsicherheiten bei der Kalibrierung darin, dass oft nicht im gleichen Gebiet zweimal ein Ausbruch eines Moränensees passiert, GLOF's stark gebietsspezifisch sind und für die Kalibration die Topographie vor dem Ereignis nicht vorhanden ist. Ausserdem reduziert sich die Aussagekraft der Resultate durch die erschwerte Abbildung der Fließdynamik eines GLOF's im Modell. Diesbezüglich war der Vorteil bei der hier vorgenommenen Kalibrierung und anschliessenden prognostischen Modellierung, dass bereits 1977 ein Seeausbruch nur 100 Meter tiefer gelegen stattfand. Eine potentielle Charakteristik eines Seeausbruches beim aktuellen See konnte dadurch etwas besser abgeschätzt und die Modellparameter in RAMMS ansatzweise kalibriert werden. Zudem konnte das Gebiet um den See und die möglichen betroffenen Gebiete vor Ort begutachtet und zusätzliche Informationen für die Plausibilitätsprüfung der Modellresultate während der Kalibration und Modellierung erhoben werden. Eine mögliche abweichende Ausbruchscharakteristik und Murgangcharakteristik bei einem zukünftigen Seeausbruch kann aber nicht ausgeschlossen werden und bringt Unsicherheiten in die Brauchbarkeit der vorgenommenen Kalibration. Die Problematik des Nichtvorhandenseins der Topographie vor dem Kalibrationsereignis bestand auch hier und musste in der Auswertung der Kalibrationsergebnisse und der darauf basierenden Szenarienbildung berücksichtigt werden. Insbesondere die Ablagerungsbereiche und im unteren Teil die neu entstandene Vegetation könnten zu grösseren Unsicherheiten geführt haben.

Vor allem die topographische Situation und die geringe Datengrundlage für vergangene Ereignisse, aber auch die Qualität der Höhenmodelle, und die Tatsache, dass der Murgang vom Ereignis 1977 in mehreren Schüben Material ins Tal transportierte, wurden hier als weitere Schwierigkeiten beurteilt und stellte die Kalibration vor eine Herausforderung, die vereinfachende Annahmen verlangte und Unsicherheiten mit sich brachte. Die stark variierende topographische Situation entlang des Untersuchungsgebietes (drei unterschiedliche Bereiche für die Reibungscharakteristik) und eine hohe Gesamtlänge der Murgangstrecke erschwerte die Kalibration der Reibungsparameter für sinnvolle Ergebnisse zusätzlich. Vor allem in flacher Topographie kam es zu grösseren Problemen bei der Bestimmung der Werte für die Reibungskoeffizienten. Es zeigte sich eine extrem starke Abhängigkeit zum coulomb Reibungskoeffizienten, so dass die Bestimmung des turbulenten Reibungskoeffizienten kaum möglich war und eine hohe Equifinalität der Wertepaare vorlag. Diese Abhängigkeit stellte auch Rickenmann (2005) fest. Die Wahl von Wertebereichen der Reibungskoeffizienten statt „best-fit“ Wertepaaren, die getrennte Kalibrierung und Modellierung der unterschiedlichen Bereiche und eine hohe Anzahl Modellierungsläufe mit einer Vielzahl an Wertepaarkombinationen für die anschliessende prognostische Modellierung wurde hier als bester Ansatz betrachtet, um dieser Problematik zu begegnen, die Unsicherheiten besser zu lokalisieren und zu beschreiben. So konnte auch die Aussagekraft der Resultate gestärkt werden. Dies durch die Analyse der Variabilität und Differenzen

der Resultate. Der grundlegende Gedanke hinter dieser Auswertungsmethodik wird auch durch Westoby et al. (2014) vorgeschlagen und in Worni et al. (2014) und in Mergili et al. (2011) in einer Fallstudie beschrieben.

Vereinfachende Annahmen mussten auch beim kalibrierten Volumen und Abfluss gemacht werden. Der maximale Abfluss aus dem See wies eine sehr grosse Differenz zum maximalen Abfluss des anschliessenden Murganges auf. Diese Prozessdynamik konnte in RAMMS nicht abgebildet werden und es wurden schlussendlich der maximale Abfluss des beobachteten Murganges und empirisch bestimmte maximale Abflüsse verwendet. Auch das Ausbruchsvolumen und totale Endvolumen zeigte eine sehr hohe Differenz auf. Die Verwendung des Startvolumens des Kalibrationsereignis 1977 führte zu unbrauchbaren Resultaten. Mergili et al. (2011) kamen in ihrer Studie im Pamirgebirge zu ähnlichen Ergebnissen und zum Schluss, dass die besten Resultate mit dem total abgelagerten Volumen erzielt werden. Die Verwendung des total abgelagerten Volumens wurde hier jedoch als schwierig beurteilt, weil das Totalvolumen aus mehreren Schüben aufgebaut wurde und so die Kalibration stärker beeinflussen könnte. Auf einen Miteinbezug von Murenschüben bei der Kalibration wurde aber auch verzichtet, da diese ohne stützende Beschreibungen hätten subjektiv abgeschätzt werden müssen. Schlussendlich wurde hier zwar das Prinzip des Endvolumens angewendet, jedoch wurde mit einem Volumen nach empirischen Skalierungsangaben für Murgänge gerechnet. Durch die Gültigkeitsbeschränkung von empirischen Werten musste damit gerechnet werden, dass das kalibrierten Volumen durchaus von der Realität stark abweichen könnten und somit die Kalibration unsicherer machen würde. Eine gewisse Sensitivität des Volumens auf die Reichweite führte dazu, dass mindestens ein Volumen von ungefähr  $500'000 \text{ m}^3$  während der Kalibration modelliert werden musste, um die reale Reichweite zu erreichen. Dies führte zum Schluss, dass entweder ein einzelner Murenschub beim Ereignis 1977 mindestens  $500'000 \text{ m}^3$  erreichen musste, oder dass die Charakteristik in RAMMS nur ungenügend wiedergegeben werden konnte. Auf eine ungenügende Wiedergabe der Charakteristik und Dynamik lässt auch die Tatsache, dass RAMMS generell Mühe hatte reale Höhen zu modellieren, schliessen. Viele Bereiche erreichten maximal 1 Meter. Aufgrund der beschriebenen Murgänge im Gebiet und den beobachteten Erosionsspuren muss aber mit grösseren Höhen gerechnet werden. Stricker (2010) und Hussin et al. (2011) beschrieben diese Tendenz von RAMMS zur Werteunterschätzung ebenfalls in ihrer Arbeit.

## **8.2 Simulation mit MSF**

Beim MSF war die Methodik die Simulation des Ereignisses 1977 um den Bereich der verwendbaren Neigungswerte zu evaluieren. Bezüglich der Reichweite zeigte sich die Wahl des Anrissortes als sensitiver Parameter. Der mathematische Hintergrund des MSF Modells verlangte jedoch bei der vorliegenden Topographie auch tiefere Neigungswerte bei tiefer gelegener Anrissstelle für die gleiche Reichweite. Ein korrektes gebietspezifisches Prozessverständnis ist demnach essentiell für die Abschätzung der Reichweite und brachte hohe Unsicherheiten in die prognostische Modellierung.

Die parallele Simulation des Ereignisses 1977 mit den Neigungskriterien  $11^\circ$  und  $8^\circ$  zeigten, dass die totale Reichweite vor allem bei  $11^\circ$  massiv unterschätzt wird. Bei  $8^\circ$  kommt es je nach Wahl des Anrissortes zur starken Unterschätzung oder zur guten Annäherung der realen Gegebenheiten.

Die Wahl des Höhenmodelles bei gleicher Pixelauflösung hatte keinen entscheidenden Einfluss auf die Resultate der Reichweite, jedoch auf die Wahrscheinlichkeitswerte. Mit dem ASTER GDEM ergaben sich generell tiefere Wahrscheinlichkeiten als für die Ergebnisse mit dem SRTM DHM. Dies kann auf die Originalauflösung der Datensätze und die dadurch bedingten Einflüsse auf die Topographie zurückgeführt werden. Die Auflösung wirkte sich auch auf den Detaillierungsgrad der möglichen betroffenen Gebiete aus. Die Sensitivitätsanalyse der Reichweite auf die unterschiedliche Auflösung ergab, dass die Reichweite ebenfalls kaum beeinflusst wird. Die Wahrscheinlichkeitswerte hingegen unterschieden sich markant. Dies bedeutet hier, dass eine tiefere Auflösung zu höheren Wahrscheinlichkeitswerten führte. Die Wahrscheinlichkeitswerte reagierten leicht auf die Wahl des Anrissortes, jedoch nicht in dem Masse, dass die Aussagen im hier möglichen Detailgrad davon beeinflusst wurden. Die Wahl der Auflösung und des Höhenmodelltyps kann die Resultate demnach beeinflussen. Dies zeigten zum Beispiel auch Stolz und Huggel (2008) und Genolet (2002) (in Rickenmann 2005) in ihren explizit darauf fokussierten Studien.

### **8.3 Repräsentativität der Realität**

Wie oben beschrieben hatte RAMMS generell Mühe, reale Höhen zu modellieren. Generell kann das Modell die Tendenzen aber gut in den verschiedenen Bereichen abbilden (Abb. 37). Die Modellierungsergebnisse mit RAMMS zeigen im mittleren Teil zwei Bereiche, die eher Erosionsgebieten entsprechen und ein Teil, wo eher Ablagerung passiert. Im unteren Teil dominiert Ablagerung und in der Murgangrinne Erosion. Die Ergebnisse des Ereignisses 2006 in Yegorov (2007) zeigen vergleichbare Resultate bezüglich den Gebieten. In Realität unterschiedene Erosions- und Akkumulationsgebiete werden durch das Modell RAMMS also abgebildet. Erosions- oder Akkumulationsgebiete können über das MSF ansatzweise über den Grad der Divergenz des modellierten Abflusses abgeleitet werden. Gerade den Bereich unter dem Wasserkraftwerk, wo Erosion und Akkumulation je nach Murgangcharakteristik vorkommen, kann mittels MSF nicht abgebildet werden. Die Ursache liegt in der Kombination von der DHM Qualität und dass die Gerinneform zwischen dem Wasserkraftwerk und Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja eine Divergenz schlecht zulässt. Das Akkumulationspotential beim Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und vor dem Murenschutzdamm wird jedoch gut angezeigt. Aufgrund der Höhenmodellauflösung zeigte das Modell RAMMS grosse Probleme im oberen und untersten Teil, wo die Topographie flach ist und wichtige kleindimensioniertere Objekte aufweist als im Höhenmodell gut abgebildet werden können. Dies ist im oberen Teil vor allem das Gerinne und die Abflussrinne im Moränenwall, im unteren Teil das Ablagerungsgebiet im verbreiterten Talbereich mit den Ablagerungen ehemaliger Murgänge und lichter Vegetation. Die Arbeit von Andres (2010) beschreibt ebenfalls die Problematik flacher Bereiche für RAMMS. Der Bereich um die Brücke am unteren Ende des Kumbeltales und des Kraftwerkes erweisen sich ebenfalls als Problemstellen. Bei der Brücke entstehen lokal extreme Maxima der Geschwindigkeits- und Höhenwerte. Dies ist zumindest teilweise darauf zurück zu führen, dass das Höhenmodell ein Oberflächenmodell ist und dadurch ein Überfliessen der Brücke notwendig ist. Der Bereich des Wasserkraftwerkes, welcher durch einen seitlichen Murenwall geschützt ist, wird immer überflossen auch bei einer Abflusshöhe von weniger als 1m. Der Murenwall hat jedoch eine Höhe von

ungefähr 10 Metern. Werden die Modellresultate mit dem MSF mit den realen Gegebenheiten verglichen, zeigt sich wie schon bei der Modellierung mit RAMMS der Bereich beim Wasserkraftwerk, als betroffenes Gebiet und muss unter Berücksichtigung des mathematischen Hintergrundes von MSF klar auf die Höhenmodellqualität zurückgeführt werden.

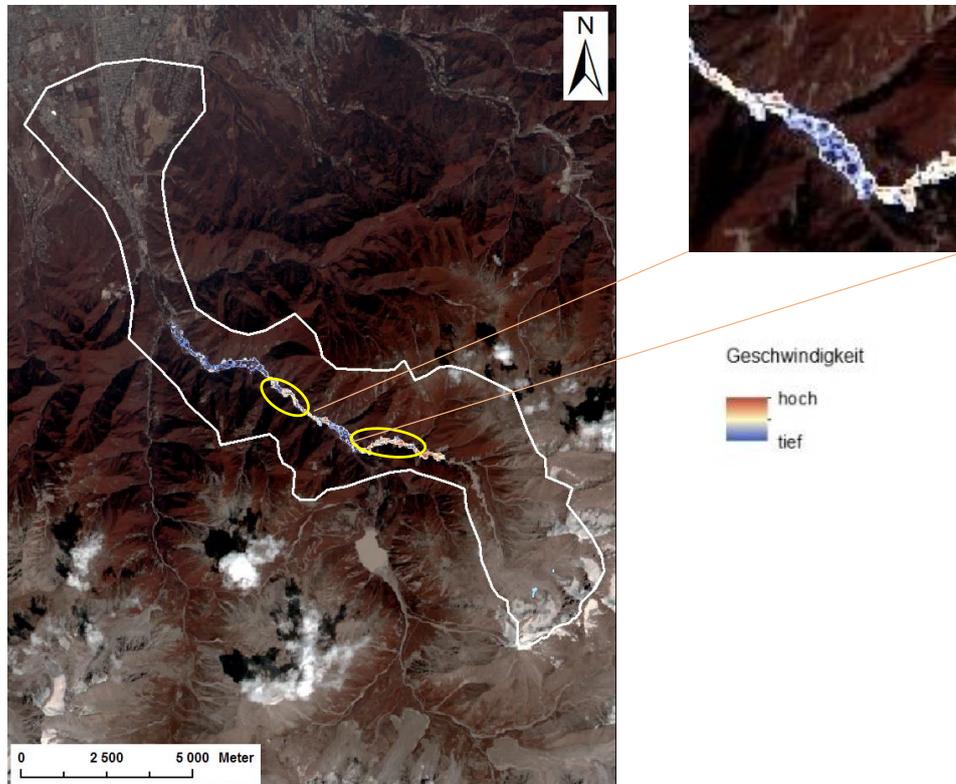


Abbildung 37: Beispiel zur Repräsentation der Realität in RAMMS. Gelbe Markierung: erhöhte Geschwindigkeiten deuten auf Erosion hin. Vergrößerter Ausschnitt: tiefere Geschwindigkeiten deuten auf Akkumulation hin. Die Resultate stimmen mit den Gebieten in Yegorov (2007) relativ gut überein.

#### 8.4 Eis-Felsabbruch als Triggermechanismus

Die Ergebnisse mit RAMMS stimmen gut mit den Ergebnissen über das MSF Modell überein. Sowohl beim See Sovetov als auch beim Gorelniksee zeigte sich mit dem Maximalwert von  $17^\circ$  für die Reichweite beim MSF und den typischen Reibungswerten bei RAMMS das Potential zum Seeimpakt durch eine Eislawine oder Felssturz. Beim Gorelniksee ist die momentane Ausbruchsgefährdung durch einen Seeimpakt durch sein geringes Volumen und dem fast 40 Meter hohen Freeboard sehr tief. Der See Sovetov zeigt eine höhere Anfälligkeit zum Ausbruch durch einen Seeimpakt vor allem aufgrund seines Volumens, tiefen Freeboards und des Oberflächenabflusses. In Verbindung mit der Gletschercharakteristik, der Lage in der Permafrostzone und deren klimatisch bedingten möglichen Verschiebung sowie der klimatischen Veränderung, insbesondere der Temperatur, wird sich das Potential eines Eisabbruches oder Felssturzes als Ausbruchstrigger mit Blick in die Zukunft erhöhen.

Die hier angewendete Methodik der iterativen Evaluation potentieller Wege, erwies sich als brauchbare Methode, wenn die Bestimmung eines Abbruchvolumens nicht sinnvoll ist, gut aufgelöstes Bildmaterial und Eindrücke von einer Feldbegehung vorhanden sind und so die Zonenausscheidung unterstützen kann. Die Analyse der problematischen Stellen durch die Aufnahmetechnik und –

geometrie bedingt, ergaben dass die Eisabbruchstellen allesamt in den als problematisch ausgedehnten Gebieten liegen. Ebenfalls liegen vor allem die potentiellen Abbruchgebiete oberhalb des Sees Sovetov in Bereichen mit grösserem Neigungsfehler zwischen den Höhenmodellen. Die Limite des MSF Modells, dass es nicht aufwärts fließen kann, führte vor allem beim Gebiet oberhalb des See Sovetov zu Unsicherheiten in den modellierten Bewegungswegen eines Eis-Felsabbruches. Die Modellierungsergebnisse müssen daher kritisch betrachtet werden. Hilfreich für die Interpretation der Modellresultate war hier die Begutachtung vor Ort. Zur Zonenausscheidung unterstützend oder wenn keine genaue Gebietsbegutachtung möglich ist, wird hier der Ansatz von Mergili und Schneider (2011) betrachtet und könnte allenfalls bei einer weiteren Modellierung integriert werden. Der sogenannte „topographic susceptibility index“ erlaubt eine Aussage über anfällige Stellen für die Auslösung einer Massenbewegung, welche in den See stürzen könnte. Er wird über eine pixelweise Berechnung der lokalen Neigung sowie der durchschnittlichen Neigung des steilsten Weges, welcher in den See führt, erhalten. Dieser Ansatz muss aber gerade in diesem Fallbeispiel vorsichtig behandelt werden, da sich die potentiellen Bereiche wie zuvor beschrieben in Aufnahmegeometrisch und –technisch ungünstigen Lagen befinden für qualitative gute Wertezuweisung im DHM.

Schneider et al. (2010) stellten eine hohe Equifinalität der Wertepaare der Reibungskoeffizienten und eine gewisse Abhängigkeit der Eis-Felssturzdynamik zur Wertepaarkombination fest. Die hier gewählten Reibungswertkombinationen passen jedoch gut in die durch Schneider et al. (2010) beobachtete Kombination hinein für Eislawinen. Für Felssturzprozesse müsste in einer weiteren Arbeit angemessene Wertepaare angewendet werden. Dies gilt ebenfalls für die Modellierung mit MSF. Ein Felsabbruch wurde hier den potentiellen Wegen eines Eisabbruches gleichgesetzt und die Anrisszonen über Bildmaterial (eigene Aufnahmen) ausgedehnt. Ob eine Abschätzung eines möglichen Eisabbruch- oder Felssturzvolumen für weiterführende genauere Abschätzungen sinnvoll ist, wird hier in Frage gestellt. Sinnvoller wird hier eher die Beobachtung des Gebiets auf Prozesse, die einen Eisabbruch oder Felssturz ankündigen können, und eine erneute Evaluation des Impaktpotentials, sobald nötig, für sinnvoll betrachtet.

### **8.5 Qualitative Abschätzung der Ausbruchsgefährdung**

Die Abschätzung ergab, dass die Gefahr für einen Ausbruch beim See Sovetov mittel bis hoch eingestuft werden kann und in Übereinstimmung mit der Evaluation von Bolch et al. (2011) steht. Mehrheitlich erhielten die Indikatoren die Werte 2 oder 3. Drei Indikatoren (Verhältnis Dammbreite/Dammhöhe, Trigger durch Erdbeben und Eislawine) erhielten den Wert 1. Der Moränenendamm kennzeichnet sich durch eine relativ breite Moränenkrete und insgesamt breiten Durchmessergeometrie aus. Die Kombination mit der distalen Hangneigung, welche knapp als 2 statt 1 eingestuft wurde, lässt eher auf gute Dammstabilität schliessen. Ein nicht klar erweiterbarer aber entscheidender Indikator für die Dammstabilität ist das Eisvorkommen im Damm. Wäre Eis vorhanden und am degradieren, so würde die Dammstabilität vor allem in Zukunft abnehmen. Die Messungen von Lentschke (2012) zeigen eishaltiger Permafrost in der Moräne an. Eine erneute Messung mit geophysikalischen Methoden (Geoelektrik und/oder Seismik) wird hier als wichtiger weiterer Schritt angesehen, um eine Vergleichsmessung zu den Ergebnissen von Lentschke (2012) zu erhalten und mögliche Veränderungen

festzustellen. Die beiden anderen Indikatoren, welche mit 1 eingestuft wurden, führten mehrheitlich zu den Unsicherheiten in der Gesamtbewertung. Das Erdbeben als Trigger kann nur schwer eingestuft werden. Das Potential zu starken Erdbeben in der Region besteht, jedoch treten diese nicht häufig auf. Daher kann die Bewertung gegenläufig ausfallen. Auch die Abschätzung des möglichen Eisabbruch- oder Felssturzvolumens war nicht möglich, jedoch kann festgehalten werden, dass diese in zu berücksichtigendem Ausmass nur selten passieren. Daher wurde diesem Indikator einen Wert von 1 zugewiesen, könnte aber möglicherweise auch höher ausfallen und trägt somit zu den Unsicherheiten in der Abschätzung bei. Die Abschätzung deutet darauf hin, dass das grösste Potential zum Ausbruch durch Überlauf besteht. Das Freeboard bis zum Oberflächenabfluss ist, Dank den gelegten Abflussrohren im Bereich von 30-50 cm. Bis zur Dammkrete beträgt das Freeboard 6-16 m. Dies lässt den Damm vor allem beim Oberflächenabfluss anfällig werden auf einen Überlauf. Eine Prozesskette eines Ausbruches über rückschreitende Erosion und damit verbundenem vergrössern des Oberflächenabflusses bis zum Dambruch ähnlich wie beim Ereignis 1977 ist gut möglich. Das tiefe Freeboard erhöht auch die Anfälligkeit durch einen Seeimpakt. Im Bezug zu den klimatischen Veränderung und Lage in der Permafrostzone muss damit gerechnet werden, dass das Freeboard durch mögliche Eisdegradation im Moränendamm weiter verringert wird. Messungen für die Abschätzung von Eis im Damm werden hier demnach als wichtiger weiterer Schritt bewertet. Die durch die bathymetrischen Messungen eruierten, sich verändernden Stellen zeigen, dass die Anfälligkeit des Dambruches eventuell auch seitlich (nord-westrand) sich erhöhen könnte. Wichtig ist hier festzustellen, von wo das Bachwasser unterhalb dieses Bereiches stammt und ob eine hydrologische Verbindung zum See besteht oder sich ausbilden könnte.

Die Ausbruchsfahr für den Gorelniksee wurde als tief eingestuft. Mehrheitlich wurde den Indikatoren eine Wertung von 1 oder 2 zugewiesen. Die Unsicherheiten wurden vor allem von den gleichen Faktoren wie beim See Sovetov verursacht. Hervorstechend ist die Schlüsselkomponente Eisabbruch, wo alle Indikatoren einen Wert 2 bis 3 erhielten. Dem Hängegletscher oberhalb des Sees wird hier in der Tat das grösste Potential für einen Ausbruch zugeschrieben. Schwierig beim Gorelniksee war auch die Abgrenzung des Moränendamms, da ein Verschmelzen mit einer blockgletscherartigen Fließstruktur vorhanden ist. Auffallend bei der Bewertung war, dass die Gesamtpunktzahl am oberen Ende für die Klassierung „tief“ war. Wird die aktuelle Situation vollumfänglich berücksichtigt, wird hier die erhaltene Gesamtpunktzahl eher als Überschätzung beurteilt. Eine Gewichtung der Indikatoren oder Schlüsselkomponenten hätte zu einem besseren Resultat geführt. Dies zeigt, dass eine hohe Subjektivität mit diesem Ansatz nicht vermeidbar ist und ein fallspezifisches Bewertungsschema wichtig ist. Falls der See an Volumen wieder gewinnen würde, könnte sich die Ausbruchsfährdung markant ändern. Insbesondere ein Bereich (Anhang 8) am Moränendamm wird im Fall einer Volumenzunahme als Schwachstelle beurteilt. Ein Seeimpakt könnte dort einen Ausbruch auslösen. Dem sehr breiten flacheren Bereich auf der westlichen Seite wird hier eine geringere Anfälligkeit zugeschrieben. Die Fließstrukturen und Messergebnisse von Lentschke (2012) zeigen jedoch das Vorhandensein von eishaltigem Permafrost an. Eine Degradation könnte die Anfälligkeit erhöhen. Im Fall einer Volumenzunahme wären eine Beobachtung des Hängegletschers

und allenfalls erneute Messungen für die Aufnahme des Permafrostzustandes im Moränendamm sinnvoll.

### **8.6 Empirische Abschätzung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches**

Westoby et al. (2014) bezeichnet, trotz dem stark gebietspezifischen Gültigkeitsbereich, die empirische Abschätzung als wertvolle Erstabschätzung. Die hier gewählten empirischen Methoden zeigten bei der Anwendung auf das Ereignis 1977 und 2006 jedoch eine starke Unterschätzung der Reichweite mit der Beziehung von Rickenmann (1999) (Formel 6.2) und zeigt, dass gerade bei einem GLOF entscheidende Prozesse nicht berücksichtigt werden können. Ausserdem zeigte sich hier, dass lange Strecken mit hoher Variabilität der Topographie problematisch sind. Das Neigungskriterium von Huggel et al. (2003) (Formel 6.1) erwies sich als eher robuster Ansatz und führte nur zu geringer Unterschätzung der beobachteten Reichweite vom Ereignis 1977 und 2006. Bei möglichen Prozesskenntnissen kann dieser Ansatz sogar anwendbare Resultate in diesem Fallbeispiel liefern. Die prognostische maximale Reichweite für einen potentiellen zukünftigen Ausbruch weichen mit dem Ansatz von Huggel et al. (2003) kaum von den Ergebnissen von 1977 und 2006 ab. Die Resultate mit der Beziehung von Rickenmann (1999) zeigen einen grossen Toleranzbereich für die maximale Reichweite. Unter Berücksichtigung der beobachteten starken Unterschätzung beim Ereignis 1977 und 2006 und des mathematischen Hintergrundes der Formel werden diesen Ergebnissen nur geringe Aussagekraft und eher den Stellenwert einer minimalen Reichweite zugeschrieben.

### **8.7 Modellierung der maximalen Reichweite eines Seeausbruches**

Die Schwierigkeiten bei der Modellierung mit RAMMS waren vor allem die Kalibrierung der Parameter und die Definition plausibler Ausbruchsvolumina für die prognostische Modellierung eines Ausbruches. Aufgrund der Schwierigkeiten in der Kalibrationsphase und den dadurch verursachten Unsicherheiten, kommt es zu einer Fortpflanzung der Unsicherheiten in der Modellierung eines Ausbruches. Herausfordernd war die geringe Datengrundlage, die hohe Variabilität der Topographie und Geomorphologie über eine lange potentielle Abflussstrecke von 15km sowie die mögliche Prozesskette bei einem Ausbruch, welche hier vor allem auf die gewählten modellierten Volumina und maximalen Abflusswerte Einfluss hatte. Die Abbildung dieser Gegebenheiten und Prozessdynamiken im Modell gestaltete sich als sehr schwierig. Die geringe Datengrundlage führte zum Entscheid für die Bestimmung der wichtigen Variablen Ausbruchsvolumen und maximaler Abfluss empirisch-statistische Beziehungen zu nutzen. Aufgrund der gebietspezifischen Gültigkeit und den Unsicherheiten bei der Abschätzung der ablaufenden Prozesse für einen zukünftigen Ausbruch sind die berechneten See- und Abflussvolumina und die maximalen Abflüsse mit Unsicherheiten behaftet und müssen dementsprechend für ein aussagekräftiges Resultat vorsichtig behandelt werden. Die Unsicherheiten für das berechnete zukünftige Seevolumen wurden durch die Bestimmung der Abweichung zum Mittel beschrieben. Die Unsicherheiten erreichten Abweichungen von -7% bis 45% zum Mittel. Eine zusätzliche Kontrollrechnung am bekannten aktuellen Seevolumen ergaben Abweichungen von -13% bis +34%. Den auf den Ausbruchsvolumina basierten empirisch skalierten Murgangsvolumina müssen dadurch noch grössere Unsicherheiten zugeschrieben werden. Die Unsicherheiten der über Formeln

berechneten maximalen Abflüsse wurden mit der gleichen Methodik evaluiert. Es ergaben sich Abweichungen von -70% bis + 568%. Die Unsicherheiten zeigte sich in einer hohen Variation der Modellergebnisse. Westoby et al. (2014) erwähnt, dass die Unsicherheiten bei der Parametrisierung des Modelles zu grösseren Ergebnisvariabilität führen kann als der Ergebnisunterschied beim Vergleich verschiedener Modelle. Diese Aussage lässt sich auch hier tendenziell beobachten. Durch die vorgenommene Modellierungs- und Auswertungsmethodik konnten jedoch die Unsicherheiten besser lokalisiert und die Aussagekraft der Ergebnisse gestärkt werden. Dies indem den entstandenen Unsicherheiten und sich ergebenden equifinalen Parameterwertepaare mit der Wahl von 4 möglichen Ausbruchsszenarien in Kombination verschiedener Parameterwertepaare begegnet wurde. So konnten durch insgesamt 48 Modellläufe pro Höhenmodell Gebiete mit höherer Unsicherheiten ausgeschieden werden sowie eine qualitative Wahrscheinlichkeitsaussage über die betroffenen Gebiete gemacht werden. Durch den Vergleich der Resultate bezüglich Volumina, Höhenmodell und veränderter Prozessannahmen konnte die Sensitivität der Resultate auf diese Faktoren evaluiert werden und so die Unsicherheiten, die jeder Faktor miteinbringt, abgeschätzt werden. Was hier nicht durchgeführt wurde, aber die Aussage verbessern könnte, ist eine Häufigkeitsanalyse der Reichweite bei einer gewissen Anzahl an Modellläufen. Dies kann als Hinweis dienen, welche Gebiete das grösste Risiko besitzen (Hussin et al. 2012).

Die Sensitivitätsanalyse auf verschiedene Ausbruchsvolumina, Wertepaare der Reibungskoeffizienten und Höhenmodellen, zeigten drei konstant auffällige Bereiche, welche gegenüber den anderen Bereichen grössere Unsicherheiten aufwiesen. Dies sind die steile Murgangrinne, der Bereich unterhalb des Wasserkraftwerkes und der Bereich um den Murenschutzdamm. Die grossen Kalibrationsschwierigkeiten im oberen Teil führten dort ebenfalls zu teilweise hoher Variabilität der Resultate und somit zu Unsicherheiten. Die sensiblen Gebiete welche im Fokus der Risikoanalyse stehen, liegen also direkt in den Gebieten mit den grössten Unsicherheiten und reduzieren die Aussagekraft der Beantwortung der Fragestellung der maximalen Reichweite und betroffenen Gebiete auf die Definition eines grösseren Toleranzbereiches. Die Modellläufe zeigten vor allem bei einem sechsfachen Ausbruchsvolumen ein Überfliessen des Murenschutzdammes an. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in der Kalibration der Reibungskoeffizienten und die dadurch hohe Variabilität der Resultate sowie der Geomorphologie im Talbereich vor dem Damm und die DHM-Qualität, wird ein Überfliessen stark angezweifelt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die gewählten Reibungsparameter das Vorwärtskommen des Murganges in diesem Bereich gegenüber der realen Geomorphologie und Topographie zu stark forciert haben, zumal die Höhenmodelle eine tiefe Auflösung aufweisen und das Vorwärtskommen ebenfalls forcieren können. Das sensitive Gebiet um das Wasserkraftwerk stellte sich ebenfalls problematisch heraus und ein Überfliessen dieses Bereiches wird auch hier angezweifelt. Die Unsicherheiten im oberen Teil beeinflussen die Prozesskette stark und somit die Resultate in den unteren sensiblen Bereichen des Untersuchungsgebietes, welche vor allem Gegenstand der Risikoanalyse sind. Diesen Unsicherheiten konnte hier über den Miteinbezug von Feldbeobachtungen und verfügbaren Beschreibungen vom Ereignis 1977 begegnet werden. Alle Modellierungsergebnisse mit RAMMS zeigten eine maximale Reichweite zwischen dem Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja, und dem Murenschutzdamm und der Stadt Almaty an. Die

mögliche maximale Reichweite zeigte auch eine gewisse Abhängigkeit von der Wahl des Höhenmodelles. Dies zeigt, dass eine Modellierung mit mindestens zwei unterschiedlichen Höhenmodellen unter wenn möglich gleichen Bedingungen durchgeführt werden sollte und bestätigt die Aussage von Stolz und Huggel (2008).

Die Wahl des Höhenmodelles und die Auflösung zeigten hingegen beim MSF Modell generell keinen grossen Einfluss auf die Reichweite, jedoch auf die Wahrscheinlichkeitswerte und den Detaillierungsgrad der möglichen betroffenen Gebiete. Mit dem ASTER GDEM ergaben sich generell tiefere Wahrscheinlichkeiten als für die Ergebnisse mit dem SRTM DHM. Die Hauptschwierigkeiten bei der Modellierung mit MSF waren vor allem die Ortswahl des Anrisses und die Unmöglichkeit auf veränderte Startbedingungen wie zum Beispiel ein grösseres Ausbruchsvolumen einzugehen. Die Wahl des Anrissortes als sensitiver Parameter auf die Reichweite brachte zu berücksichtigende Unsicherheiten in die Interpretation der Resultate. Ein korrektes gebietsspezifisches Prozessverständnis wurde demnach als essentiell für die Abschätzung der Reichweite beurteilt. Das veränderte Startbedingungen nicht integriert werden können, führt dazu, dass die potentielle maximale Reichweite „nur“ über verschiedene Neigungsszenarien abgeschätzt werden können und kein Unterschied zwischen aktueller und zukünftiger Situation gemacht werden konnte. Somit bleiben die Resultate starr in Bezug auf Veränderungen im Seevolumen. Dies führte zu den Hauptunsicherheiten in den Modellresultaten und zugleich zum Schwachpunkt des MSF Modelles. Herausfordernd dabei war die geringe Datengrundlage für die Wahl geeigneter kritischer Neigungswerte. Wie auch bei RAMMS beeinflusste die Annahme der Prozesskette die Resultate der Modellierung. Das MSF Modell zeigte sich aber als robuste Methode für eine grobe Erstabschätzung. Des Weiteren lässt die hier vorgenommene Analyse der kritischen Neigungswinkel tendenziell vermuten, dass eine Verschiebung der Empfehlungswerte der kritischen Neigungswinkel von Huggel et al. (2004) und Rickenmann und Zimmermann (1993) (in Rickenmann 2005) für eine bestimmte Murgangcharakteristik für das hier vorliegende Untersuchungsgebiet und den untersuchten Prozess vorliegt. Hegglin und Huggel (2008) stellten kritische Neigungswinkel in Abhängigkeit des Seevolumens zusammen. Die Werte ( $3^{\circ}$ - $6^{\circ}$ ) für die hier verwendeten Volumina stimmen gut überein mit den hier erhaltenen Resultaten. Mit dem MSF liegt die mögliche maximale Reichweite ebenfalls bei Murenschutzdamm und der Stadt Almaty. Je nach Neigungskriterium wird aber nur eine maximale Reichweite bis auf Höhe des Wasserkraftwerkes angezeigt. Aufgrund der grösseren angezeigten Unterbrüche bei höheren Neigungskriterien im oberen Teil, kann daraus geschlossen werden, dass für eine Gefährdung der sensiblen Gebiete entweder ein erneuter Murgang in der Murgangrinne ausgelöst werden muss, oder die Viskosität des Murganges tief genug sein muss, damit der flachere obere Teil des Untersuchungsgebietes überwunden werden kann und der Murgang sich in der Murgangrinne fortsetzt.

Es wird hier auch die Frage aufgeworfen, wie weit die Fragestellung nach der maximalen Reichweite sinnvoll beantwortet werden kann. Das Kalibrationsereignis 1977 mit einem doch wesentlich kleineren Volumen erreichte den Murenschutzdamm. Die aktuellen und auch projizierten Verhältnisse weisen ein viel höheres Seevolumen auf. Für ein worst-case Szenario muss also damit gerechnet werden, dass

der Murenschutzdamm erreicht wird. Die diskutierten Unsicherheiten bei der Modellierung und die Dimension des Murenschutzdammes lassen ein Überfließen des Murenschutzdammes und eine Gefährdung der Stadt Almaty, wie es in den Modellierungsergebnissen angezeigt wird, anzweifeln. Eine genauere Modellierung im unteren Bereich mit der Evaluation, wie weit die Kapazität des Murenschutzdammes bei einem Ereignis ausgeschöpft wird, werden hier als weitere wichtige Schritte angesehen. Schlussendlich muss an dieser Stelle auch hervorgehoben werden, dass die hier angewendete Methodik bei RAMMS und dem MSF Modell die Annahme der Ausbildung eines Murganges machte. Die Charakteristik einer hyperkonzentrierten Flut wurde nicht in die Modellierung integriert. Die Ergebnisse der Risikoanalyse beschränken sich daher auf den Prozess Murgang durch einen GLOF. Als grösste Unsicherheit wird hier die Unmöglichkeit der Integration von der Prozessdynamik eines GLOF für die Fragestellung beurteilt und kann in Übereinstimmung mit der Aussage von Westoby et al. (2014) gebracht werden.

### **8.8 Verwendete Höhenmodelle**

Die Originalauflösung der Höhenmodelle ASTER und SRTM war mit 30m und 90m relativ grob und führte zu einer weicheren Topographie. Wichtige feinstrukturierte Geomorphologie und Strukturen wie zum Beispiel der seitliche Murenschutzwall beim Wasserkraftwerk wurden nicht korrekt abgebildet und führten zu unsicheren Modellergebnissen in solchen Bereichen und zeigte die Wichtigkeit der Plausibilitätsprüfung durch Feldbeobachtungen. Eine höhere Auflösung würden die Resultate bei geeigneter Methodik sicherlich verbessern. Fehlerhafte Höhenangaben in den Höhenmodellen an wichtigen Stellen könnten durch Messungen vor Ort korrigiert werden (z.B. Hussin et al. 2012). Für die Eis-Felssturz-Modellierung wird der Effekt der weicheren Topographie im SRTM DHM gegenüber dem ASTER GDEM jedoch als wertvolle Ergänzung angesehen. Unsicherheiten in und die Qualitätseinschränkungen der Höhenmodelle pflanzen sich in die Resultate von RAMMS (insbesondere in die Fliesshöhen, Auslaufdistanz und Ausbreitung) fort, wie auch Andres (2010) beschreibt. Sie hat den Einfluss von Unsicherheiten in SRTM und ASTER DHM's auf die Modellierung mit RAMMS untersucht. Der generische Typ und die Qualität des Höhenmodelles beeinflusst also die Resultate und somit ist ein Vergleich von Höhenmodellen unterschiedlicher Herkunft (z.B. Stolz und Huggel 2008) und die Qualitätsverbesserung der DHM's wichtig. In dem hier möglichen Detailgrad der Analyse zeigten beide Höhenmodelle ähnliche Resultate, wobei hier geschlossen wird, dass das ASTER GDEM für die GLOF Modellierung etwas besser geeignet ist als das SRTM DHM aufgrund des höheren geomorphologischen Detailgrades. Des weiteren entspricht die Topographie in den Höhenmodellen nicht der Topographie von 1977. Die Kalibration wird dadurch unsicherer. Insbesondere die Ablagerungsbereiche und im unteren Teil die neu entstandene Vegetation können zu grösseren Unsicherheiten führen. Die dynamischen Gebiete vor allem im oberen Teil und im unteren Teil die Ablagerungsgebiete widerspiegeln die aktuelle Topographie unter Umständen mangelhaft. Die Modellierung vor allem mit dem SRTM muss kritisch betrachtet werden. Das GeoEye bildete hier für den oberen Teil die Ergänzung mit der Topographie von 2012 und mit einer Auflösung von 5m. Jedoch wies das Höhenmodell grössere Artefakte auf, glücklicherweise vorwiegend in uninteressanten

Gebieten für diese Fallstudie. Der grössere Fehler am Moränendamm war ebenfalls glücklicherweise in einem Bereich, der weniger einschränkend für die Modellierung war.

### **8.9 RAMMS versus MSF**

Werden die Modellierungsergebnisse mit RAMMS und MSF untereinander verglichen, wird ersichtlich, dass beide die gleichen Tendenzen zeigen und eine gute Übereinstimmung bezüglich der maximalen Reichweite vorliegt. Bezüglich den Vorteilen und Nachteilen, welche die beiden Modelle für sich aufweisen, wird die ergänzende Eigenschaft der Modelle für eine Anwendung wie in dieser Fallstudie als grösstes Potential gewertet. Die höhere Anzahl notwendigen Eingangsdaten in Kombination mit der geringen Datengrundlage für dieses Gebiet und auch die allgemeine Schwierigkeiten bei der Prozessabbildung eines GLOF im Modell (z.B. Westoby et al. 2014, Worni et al. 2014) ergeben zwar hohe Unsicherheiten in der Modellierung mit RAMMS und lassen eher qualitative statt quantitative Aussagen zu. Die Möglichkeit der dynamischen Darstellung der Modellergebnisse können aber auf genauere zu betrachtende Bereiche besser hinweisen und die Interpretation möglicher Prozessabläufe besser unterstützen als die statischen Ergebnisse mit dem MSF Modell. Dies zeigte sich in diesem Fallbeispiel zum Beispiel im oberen Bereich des Untersuchungsgebietes, wo RAMMS auf die tendenzielle Rolle des Seebeckens des ehemaligen Sees hindeutet oder auch das Aufstauen beim Zusammenfluss. Mit dem statischen MSF Resultat kann ein solcher Prozess schlechter abgeleitet werden und ist abhängig von der Wahl des kritischen Neigungswinkels. In diesem Fallbeispiel wo eine Feldbegehung möglich war, konnte dieses Resultat zwar auch visuell abgeleitet werden, gerade aber für Regionen, wo eine Feldbegehung nicht möglich ist, wird dieses Potential von RAMMS als wertvoll eingestuft. Sich als nützlich ergänzend in Bezug auf die Risikoanalyse wird hier auch die Art der Ergebnisse bewertet. Eine Wahrscheinlichkeitsangabe für die Risikobewertung für einen GLOF wird von verschiedenen Autoren (z.B. Hussin et al. 2012, Westoby et al. 2014) als sinnvoller betrachtet. Durch die allgemeinen und oft hohen Unsicherheiten bei der Modellierung eines GLOF wäre eine quantitative Aussage über mögliche Höhen und Geschwindigkeiten oder Druckbelastung auf Objekte weniger sinnvoll. Diese Tatsache traf bei der hier vorliegenden Fallstudie zu. Die Wahrscheinlichkeitsangabe wird durch die Resultate mit dem MSF Modell unterstützt. Über die Resultate mit RAMMS kann das Prozessverständnis und die Ergebnisinterpretation verbessert werden. Je nach möglichem Detailgrad, können sogar quantitative Werte der RAMMS Resultate miteinbezogen werden. Im hier vorliegenden Fallbeispiel und Übertragen auf Gebiete mit geringer Datengrundlage und erschwerter Zugänglichkeit können mit RAMMS durch geeignete Auswertungsmethoden Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden und unterstützen so die Wahrscheinlichkeitsangaben mit MSF durch Parameter mit anderen Einheiten. Die Stärke des MSF Modelles liegt in der schnellen und mit weniger Modellierungsbedingten Unsicherheiten beladenen Modellierung. Dies aufgrund der geringen Anzahl Eingangsdaten und dadurch bessere Anwendbarkeit für Gebiete mit geringerer Datengrundlage sowie geringerer notwendiger Rechenkapazität. Ein weiterer Vorteil liegt in der Wahrscheinlichkeitsaussage der Ergebnisse. In der Fallstudie zeigte sich auch, dass das MSF weniger sensitiv auf die Topographie vor allem in flacheren Bereichen reagierte. Das MSF Modell zeigte sich robuster gegenüber Artefakte, auflösungsbedingter ungenauer Topographie und unebener Topographie gegenüber dem RAMMS Modell. Dies zeigte sich konkret markant im untersten Teil des

Untersuchungsgebiets, wo grössere Unsicherheiten in den RAMMS Resultaten lokalisiert werden konnten. Das Modell konnte dort nicht forciert fließen und je nach Volumen kam es zum Überfließen des gesamten Talbodens. Die MSF Resultate zeigten dort ein forciertes, weniger divergierendes Fließen. RAMMS zeigte ebenfalls in flacher Topographie mit feinstrukturierter Morphologie grössere Schwierigkeiten für das Vorwärtskommen des Murganges. Gerade bei unsicherer Kalibrierung besteht die Gefahr, dass die gewählten Parameterwerte das Vorwärtsfließen unrealistisch hemmen oder forcieren. Die MSF Resultate waren diesbezüglich eine wertvolle Ergänzung.

### **8.10 Prognostische Modellierung von Gletscherseeausbrüchen**

Die komplexe und gebietspezifische Charakteristik eines Gletscherseeausbruches und die daraus entstehende talwärts fließende Massenbewegung, stellt die Modellierung in verschiedenen Aspekten vor grosse Herausforderungen. Aktuell bestehen keine Modelle um ein solches Ereignis vollumfänglich abzudecken. Dies liegt vor allem in der Multiprozess-Charakteristik (Triggermechanismus – Dambruch – Abfluss des ausgebrochenen Wassers) eines solchen Ereignisses, bei der jeder Prozess andere Faktoren und physikalische Grundlagen voraussetzt und die bestehenden Modelle nicht auf solche Prozessketten ausgerichtet sind (Westoby et al. 2014, Worni et al. 2014). Es seien hier als Beispiele die verschiedenen möglichen Triggermechanismen, die Dammmenge und –charakteristik sowie die Topographie und morphologische und geologische Charakteristik des Fließweges talwärts als Faktoren erwähnt. Weiter dazu kommen, das noch geringere Verständnis einer solchen Multiprozesskette und die Tatsache, dass die Grundlage, durch das nicht häufige Auftreten solcher Ereignisse, nicht gross ist. Ein Schritt um dieses Problem zu mindern beschreibt Vilimek et al. (2014): Der Aufbau einer online verfügbaren Datenbasis über weltweit aufgetretene GLOF's soll die gebietspezifische Risikobewertung unterstützen (<http://glofs-database.org/>). Worni et al. (2014) geben in ihrer Studie einen guten Überblick über die Modellierung von Multiprozessketten bei einem GLOF und die bestehenden Herausforderungen. Dabei gehen sie auf die Methodik einer prozessgetrennten Modellierung der Prozesskette mit dem jeweilig repräsentativsten Modell als auch auf die Modellierung der gesamten Prozesskette mittels einem Modell (BASEMENT) ein. Diese Problematik zeigte sich auch in der hier vorgenommenen Modellierung. Die Modellierung fokussierte sich auf zwei Teilbereiche: der Eisabbruch als möglicher Trigger und ein durch einen Seeausbruch entstandenen Murgang. Diese wurden getrennt modelliert, weil die verwendeten Modelle nicht auf Prozessketten ausgerichtet sind, aber auch die Fragestellung nicht unbedingt die Prozessverbindung im Modell verlangte. Bei der Prozessbeurteilung entstanden dabei aus den oben genannten Gründen grössere Unsicherheiten, welche dazu führten, dass eher qualitative statt quantitative Aussagen gemacht werden konnten und mit Toleranzbereichen statt fixen Werten gearbeitet werden musste. Quantitative Aussagen in der Risikoanalyse sind jedoch auch allgemein oft sehr schwierig aufgrund fehlender Daten und Prozessabbildung (Hussin et al. 2012). Ein Beispiel für die quantitative Risikoanalyse mit numerischer Modellierung findet sich in Quan Luna et al. (2011). Möglichkeiten zu quantitativen Aussagen für prognostische GLOF Modellierung zeigt die Fallstudie von Nussbaumer et al. (2014). Ein Ausbruch eines Moränensees kann mit einer kompletten Entleerung des Sees verbunden sein, so dass es in einer Region oft beim Einzelereignis bleibt. Wichtige Faktoren für die

Charakterisierung eines Ereignisses können häufig nicht erhoben werden und die Topographie ist oft nicht im nötigen Detailgrad vorhanden (Westoby et al. 2014, Worni et al. 2014). Die Definition von universal geltenden Parameter ist dadurch kaum möglich und erschwert die Modellierung stark. Diesbezüglich war der Vorteil bei der hier vorgenommenen prognostischen Modellierung, dass bereits 1977 ein Seeausbruch nur knapp 100 Meter tiefer gelegen stattfand. Eine potentielle Charakteristik eines Seeausbruches beim aktuellen See konnte dadurch besser abgeschätzt und die Modellparameter in RAMMS ansatzweise kalibriert werden. Über eine Begutachtung vor Ort konnten zusätzliche Informationen für die Plausibilitätsprüfung der Modellresultate und für die Modellierung selber erhoben werden. Für den oberen Bereich stand sogar ein höher aufgelöstes Höhenmodell zur Verfügung. Erschwerend war, dass für die Region des Untersuchungsgebietes wenig Information über vergangene Ereignisse und die Charakteristik möglicher Murgänge vorhanden war.

Ein erwähnenswerter Punkt ist, dass die prognostische Modellierung oft, wie auch hier, auf vergangenen Daten beruht (BAFU 1998, Keiler und Fuchs 2007). Die Veränderungen der glaziologischen und geomorphologischen Bedingungen, können sich auf einen zukünftigen Ausbruch so auswirken, dass historische Erfahrungswerte ihren Gültigkeitsbereich verlieren. (Käab et al. 2005, Westoby et al. 2014). Zusätzlich muss hier die Möglichkeit einer abweichenden Dynamik vom Ereignis 1977, aufgrund möglicher anderer Umgebungsbedingungen (z.B. trockene Abflussrinne bei Ausbruch durch eine Eislawine) in Betracht gezogen werden. Nicht zuletzt, da der Erfahrungswert im Untersuchungsgebiet auf einem einzigen Ereignis für einen Seeausbruch beruht. Die Ergebnisse müssen daher mit Blick in die Zukunft und anderer möglicher Prozessabläufe unter gewissem Vorbehalt betrachtet werden und sind mit Unsicherheiten behaftet. Inwiefern zum Beispiel ein Murgang bis zur Murgangrinne gelangt oder ob es eher zu einem Szenario wie 1977 kommt, bleibt hier offen. Auch die Rolle des Seebeckens des ehemaligen Sees kann die Folgen eines Seeausbruches wesentlich beeinflussen. Auf welche Weise, kann aus den Modellresultaten als Tendenz abgeleitet werden, erlauben jedoch keine genauere Aussage.

Grossen Einfluss für die Charakterisierung eines GLOF's hat die Bruchbildung am Damm, welche die Charakteristik der Abflusskurve und somit die Charakteristik eines GLOF's entscheidend beeinflusst. Nach Westoby et al. (2014) und Worni et al. (2014) kann die Abflusskurve eines Seeausbruchs auch stark von der Abflusskurve des Murganges oder der hyperkonzentrierten Flut talabwärts abweichen. Dies gilt vor allem für Gebiete mit viel mobilisierbarem Material. Auf das Untersuchungsgebiet konnte diese Problematik übertragen werden. Die möglichen Prozessvorgänge auf der Abflusstrecke (z.B. Sedimentaufnahme oder –ablagerung oder Wasseraufnahme und dadurch veränderte Viskosität) und die dadurch variable Abflussdynamik des Murganges oder der hyperkonzentrierten Flut sind eine der Hauptquellen für die Unsicherheiten bei der Modellierung des Murganges, da sie vereinfachende Annahmen erzwangen. In der vorliegenden Fallstudie wurde dies über die getrennte Modellierung ab dem See und ab der Murgangrinne mit verschiedenen Volumina und maximalen Abflüssen sowie unterschiedlichen Reibungswerten berücksichtigt. GLOF's können auch eine Schubweise Charakteristik aufweisen. Dies konnte hier nicht berücksichtigt werden, obwohl die Beschreibungen zum vergangenen Ereignis zum Beispiel mehrere Schübe angaben. Dies brachte in die Abschätzung der Reichweite weitere Unsicherheiten. Das Verwenden eines einzigen Schubes kann aber als worst-case

Szenario betrachtet werden. Modellresultate aus Modellen, wie die hier verwendeten, welche hohe Prozessdynamik insbesondere die variable Sedimentaufnahme nicht berücksichtigen können, müssen unter Vorbehalt betrachtet werden und die Unsicherheiten evaluiert werden (Westoby et al. 2014).

### **8.11 Risikoanalyse**

Die Teilschritte 2 und 3 der Risikoanalyse, als Antwort auf die Fragestellung nach der maximalen Reichweite und Ausbruchswahrscheinlichkeit, können anhand der Ergebnisse folgendermassen beschrieben werden:

Das Start- und Transitgebiet können klar definiert werden. Ablagerungsprozesse können noch im oberen Teil des Untersuchungsgebietes stattfinden. Die Ablagerungsgebiete eines Murganges bei einem möglichen zukünftigen Seeausbruch können aber auch sensible Gebiete mit Infrastruktur und Siedlung beinhalten. Dies ist stark abhängig vom Triggermechanismus für den Seeausbruch und dem Zustand des gesamten Gebietes (z.B. wassergesättigte Böden) sowie der Prozesskette zwischen Seebecken des ehemaligen Sees und dem flacheren Bereich bis zur steilen Murgangrinne.

Im Falle eines Ausbruches und dass ein Murgang die sensiblen Gebiete erreicht, werden vor allem die Kumbelbrücke, Strassenabschnitte nahe am Flussbett und die Zone um das Flussbett, welche als Picknickplatz genutzt werden als stark gefährdet betrachtet. Das Gefährdungsgebiet reicht mindestens bis zum Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja, möglicherweise aber bis zum Murenschutzdamm. Die Topographie, das Ereignis 1977 und die Modellergebnisse lassen vermuten, dass es beim Erreichen des Zusammenflusses mindestens zum temporären aufstauen kommt. Das immaterielle Schadenspotential wird hier bei Ausbruch durch einen Trigger, der auch bei Schönwetter (z.B. Eislawine) passieren kann, als höher eingestuft als bei Schlechtwetter, da dann mit mehr Personen im Gefährdungsgebiet gerechnet werden muss. Einen hohen vorgesättigtem Boden kombiniert mit Niederschlagsbedingten Ausbruch kann zu einem grösseren Murgang führen und somit eine grössere Reichweite und mindestens grösseren materiellen Schaden verursachen. In Bezug auf die zeitliche Komponente wird hier den Sommermonaten das höchste Gefährdungspotential für einen Ausbruch zugeschrieben. Nach Blagovechshenskiy und Yegorov (2009) wurden in den Sommermonaten am häufigsten Seeausbrüche beobachtet. In diesen Monaten kann auch ein hohes Potential für einen Eisabbruch oder Felssturz vermutet werden und aufgrund vergangener Ereignisse auch Starkniederschläge als Ausbruchsmechanismus. Die klimatischen Veränderungen im Kontext der Permafrostlage und Gletschercharakteristik deuten darauf hin, dass ein Eisabbruch oder Felssturz in Zukunft wahrscheinlicher wird. Der Gorelniksee wird für einen Ausbruch durch einen Eisabbruch potentiell als gefährdeter beurteilt, jedoch erst, wenn sich das Volumen wieder vergrössern würde. Mit einem berechneten mittleren potentiellen Volumen von 867'000 m<sup>3</sup> gemäss den GlabTop-Resultaten und der Flächen-Volumenbeziehungen verschiedener Autoren (vgl. Kapitel 6.4.4.1) könnte auch beim Gorelniksee ein beträchtliches Volumen ausbrechen. Für den See Sovetov besteht aufgrund der Modellierungsergebnisse und Feldbegehung auch das Ausbruchspotential über einen Eisabbruch oder Felssturz, wird aber für den Abbruch selber geringer als für den Gorelniksee betrachtet. Das Ausbruchspotential hingegen ist sehr hoch im Falle eines Seeimpaktes. Die

Ausbruchswahrscheinlichkeit über die qualitative Abschätzung konnte als mittel und vor allem mit Blick in die Zukunft bis hoch eingestuft werden.

Die Möglichkeit für ein GLOF ist vor allem von der Anfälligkeit des Moränendamms zum Kollaps abhängig. Diese Anfälligkeit kann am besten durch geotechnische und geophysikalische Methoden beurteilt werden (Worni et al. 2014). Eine wichtige und hier eher unsichere Variable ist das Vorhandensein von Eis im Damm. Daher wird hier empfohlen, den Damm auf möglichen Eisgehalt und dessen Zustand zu untersuchen. Die Korngrößenverteilung des Damms wurde hier ebenfalls nicht berücksichtigt, ist aber eine wichtige Komponente für die Evaluation der Dammstabilität und das Ausbruchsverhalten. Eine Analyse sollte in Betracht gezogen werden.

Der Vergleich der bathymetrischen Vermessungen der Jahre 2013 und 2014 lassen auf vier Regionen, in denen sich der See verändert schliessen. Zum einen existieren zwei Bereiche am Zungenrand des Gletschers, in denen der See tiefer wird. Die anderen beiden Bereiche liegen je am seitlichen Rand des Sees. Dort liegt viel Schuttbedecktes Eis, das nun abschmilzt und mehr Seefläche frei gibt. Von Interesse ist vor allem der nord-westliche Rand des Sees. Unterhalb des nord-westlichen Randes existiert ein Bach. Falls der Bach im See seinen Ursprung hat, wäre ein potentieller Ausbruch auch seitlich möglich. Tracer-hydrologische Messungen wären hier ein gutes Mittel um dies zu bestimmen.

Die hier durchgeführte Risikoanalyse ist aus mehreren Gründen mit zum Teil hohen Unsicherheiten behaftet. Als ein sehr wichtiger nächster Schritt wird der Miteinbezug lokaler Experten angesehen. Ihr Wissen kann die hier erhaltenen Ergebnisse kritisch hinterfragen und verbessern.

## **8.12 Risikomanagement**

Der See Sovetov stellt aufgrund der erhaltenen Ergebnisse eine Gefährdung für sensible Gebiete dar. Angemessene gefährdungsmindernde Massnahmen sollten in Betracht gezogen werden. Bereits bestehend, liegen zwei Abflussrohre im Oberflächenabfluss des Sees für die Seespiegelabsenkung. Dies zeigt zumindest temporär Wirkung. Gewinnt der See durch Flächenausdehnung und tieferen Bereichen an Volumen, besteht vor allem im Kontext eines möglichen Seeimpaktes trotzdem die Ausbruchsfahr mit einem genügend grossem Volumen. Die Massnahmen zur Seespiegelabsenkung beim See, der 1977 ausgebrochen war, zeigten, dass solche insbesondere wenn stabilisierendes Eis im Damm vorhanden ist, eine Destabilisation forcieren. Andere aktive Massnahmen sollten in Betracht gezogen werden und auf deren Möglichkeiten geprüft werden. Aufgrund der hohen Transportstrecke bis zu den sensiblen Gebieten wird hier der Aufbau eines (Früh-)Warnsystems als Möglichkeit betrachtet. Insbesondere auch deshalb, weil das Gebiet nur unter hohem Aufwand erreichbar ist und ein Gletscherseeausbruch nur schwer Vorhersagbar ist. Ein (Früh-) Warnsystem besteht nach Zschau und Küppers (2003), Basher (2006) und Grasso (2009) aus 4 Komponenten:

- Das Risikobewusstsein
- Das Monitoringsystem
- Die Kommunikation von Warnungen
- Das Reaktionsvermögen der Betroffenen

Das Risikobewusstsein wurde in dieser Arbeit angesprochen und behandelt und basierend darauf hier Möglichkeiten zu den anderen drei Komponenten kurz diskutiert. Ein (Früh-)Warnsystem muss den Anforderungen des genug früh warnen können und der Vertrauenswürdigkeit nachkommen (Zschau und Küpper 2003 und Badoux et al. 2009) (Abb. 38). Obwohl die Prognose eines Seeausbruches frühzeitig kaum möglich ist, lässt die hohe Transportstrecke eine gewisse Vorwarnzeit zu. Ein erster Schritt könnte zum Beispiel die Beobachtung des Sees (Seespiegel, Oberflächenabfluss) und der Umgebung mit einer Videokamera sein, sowie die Installation einer Wetterstation (Niederschlag- und Temperaturmessung) (z.B. Keusen et al. 2013). Bei problematischen Veränderungen könnten weitere Massnahmen eingeleitet werden. Allenfalls könnten zum Beispiel Geophone zur Murgangdetektion installiert werden, sowie akustische oder optische Signalisation an kritischen Stellen wie der Kumbelbrücke, welche im Falle, dass die Geophone einen Murgang erkennen, automatisch eine Warnung abgeben (z.B. Badoux et al. 2009). Herausfordernd ist hierbei sicher die Installation der Geophone, so dass sie nicht bei jedem Murgang beschädigt werden, da das Gebiet stark murenaktiv ist. Gerade auch aus diesem Grund, wäre es sinnvoll die Geophone oder auch andere Messinstrumente möglichst weit oben zu installieren, damit sie nicht jeden Murgang, aber solche die gross genug sind um sensible Gebiet zu erreichen, erfassen. Weitere Herausforderungen und Limiten wie Energieversorgung oder Funkübertragung gibt Badoux et al. (2009). Eine Sensibilisierung der Bevölkerung durch Infotafeln an gefährdeten Stellen (z.B. Eigene Beobachtung (Gletschersee Plain-Mort, Schweiz), Badoux et al. 2009 (Illgraben, Schweiz)) wird hier ebenfalls als Möglichkeit der Risikominderung angesehen.

Schlussendlich ist es für einen Erfolg bei einem Warnsystem auch zentral, dass sich die Akteure ihrer Funktion und Aufgabe bewusst sind sowie ein gutes Kommunikationssystem und eine gute Koordination zwischen den Akteuren möglich ist (Kienholz et al. 2004, Basher 2006, Hegglin und Huggel 2008, Carey et al. 2012). Die Möglichkeiten dazu müssten in diesem Fallbeispiel in einem weiteren Schritt genauer betrachtet werden. Gemäss dem Bericht CAC DRMI (2009) welche das Naturgefahren-Risikomanagement auf die Verfügbarkeit der verschiedenen Komponenten untersucht hat, sind gerade die Komponenten des Monitoring und der Kommunikation hier allgemein nicht genügend vorhanden im Naturgefahren-Risikomanagement. Neben den Massnahmen, wäre es vor allem bei weiterer Volumenzunahme sinnvoll, die Auswirkungen eines Seeimpaktes durch einen Eis-Felssturz abzuschätzen. Dies kann empirische Beziehungen oder auch die Modellierung beinhalten (z.B. Worni et al. 2014). Ein mögliches Vorgehen zeigt Worni et al. (2013).

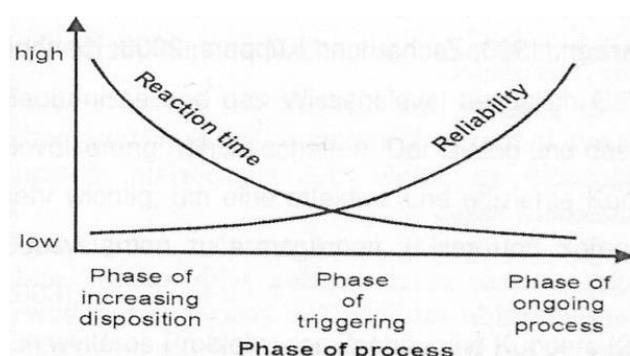


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit der Warnung und der Reaktionszeit bzw. des Zeitpunktes der Warnausgabe (Quelle: Zschau und Küppers 2003)

## 9. Synthese und Ausblick

Die Arbeit zeigt die verschiedenen Herausforderungen und Unsicherheiten bei einer Risikoanalyse eines Gletscherseeausbruches in einem Gebiet, für das die zur Verfügung stehende Datengrundlage gering ist und viele Unsicherheiten mit sich bringt, auf. Es erwies sich hier als zentral Auswertungsmethoden zu wählen, welche die Bewertung der Unsicherheiten ermöglichten und so die Aussagekraft der Ergebnisse stärkten. Weiter vermittelt diese Arbeit einen ersten Eindruck zum Potential der Modellierung eines Eis-Felsabbruches für einen Seeimpakt und eines GLOF's mittels den Abflussmodellen RAMMS und MSF im Vergleich.

Die wichtigsten methodischen Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit sind:

- Die Modellierung der potentiellen Falllinien erwies sich als eine gute Möglichkeit der Erstabschätzung eines Seeimpaktes durch einen Eis-Felsabbruch. Keines der beiden verwendeten Modelle zeigte einen Mehrwert gegenüber dem anderen im hier betrachteten Detailgrad und beide zeigten vergleichbare Resultate. Die Unsicherheiten in der Wahl der Reibungskoeffizienten und der vorherrschenden Equifinalität (z.B. Schneider et al. 2010) sowie die Tatsache, dass die hier verwendete RAMMS Version für Murgangprozesse vorgesehen ist, behaftet die RAMMS Resultate mit grösseren Unsicherheiten.
- Die qualitative Gefährdungsabschätzung für einen Ausbruch ist stark subjektiv. Eine gewisse Subjektivität ist aber notwendig um eine angemessene Bewertung zu erhalten wie das Beispiel am Gorelniksee zeigte. Eine angepasste Gewichtung der Schlüsselkomponenten und Indikatoren wäre in diesem Fallbeispiel ein Verbesserungspunkt. Dazu ist eine gute Gebietskenntnis nötig und in dem Sinne eine Zusammenarbeit mit Experten die das Gebiet gut kennen, erstrebenswert.
- RAMMS und MSF können die Tendenzen gut abbilden und ergeben im Zuge einer Erstbegutachtung übereinstimmende Resultate. Mit RAMMS werden bei geringer Datengrundlage und Gebietskenntnis aber nur sehr unsichere Resultate erhalten, aufgrund der grösseren Anzahl zu bestimmenden Eingangsparameter. Die Verwendung eines einzelnen prozessgleichen Kalibrationsereignis macht die prognostische Modellierung sehr unsicher und abhängig von den vergangenen Daten. Eine breitere Datengrundlage mit weiteren Ereignissen zum Beispiel gebietserweiternd über den gesamten nördlichen Tien Shan und durch die Verwendung in Russisch vorhandener Literatur wäre ein Verbesserungsschritt. Das MSF zeigt hier seine Stärke der geringen Anzahl notwendigen Eingangsdaten (Höhenmodell, Anrisszone und kritische Neigung), die weniger vereinfachende Annahmen erforderten. Jedoch kann die dynamische Darstellung in RAMMS auf mögliche Prozessabläufe besser hindeuten und so die starren Resultate mit dem MSF Modell ergänzen und die Interpretation stützen. Die Bestimmung eines geeigneten kritischen Neigungswinkels beim MSF gestaltet sich jedoch als sehr unsicher. Der Umgang mit der Wahl des kritischen Neigungswinkels insbesondere für ein worst-case Szenario, beeinflusst die Resultate empfindlich.
- MSF ist weniger sensitiv auf die Topographie und somit auf die Qualität des Höhenmodelles als RAMMS. Für das Gebiet in dieser Fallstudie mit langer Murgangstrecke, hoher

morphologischer und topographischer Variabilität und wo keine hoch aufgelösten Höhenmodelle über die gesamte Strecke vorliegen, zeigte sich das MSF Modell als robuster.

- Die Abbildung der Prozesskette bei einem GLOF im Modell stellte sich als grosse Schwierigkeit in der Modellierung heraus. Die Annahmen für die mögliche Prozesskette und Initialbedingungen beeinflussten die Modellierungsergebnisse stark und bildeten die grössten Herausforderungen und Unsicherheiten für die Risikoanalyse. Der Miteinbezug von lokalem Expertenwissen und guter Gebietskenntnis für eine bessere Abschätzung der Prozesskette und ein angemesseneres Erstellen von Annahmen wird hier als wichtigster Verbesserungsschritt angesehen.
- Die Sensitivitätsanalyse der Auflösung und des Höhenmodelltyps auf die Modellierungsergebnisse der Reichweite eines GLOF's und Eis-Felsabbruches als Trigger sowie der Wahrscheinlichkeitsaussage im Kontext einer Risikoanalyse erwiesen sich als zentral. Generisch unterschiedliche Höhenmodelle und unterschiedliche Auflösung können die Modellierungsergebnisse stark beeinflussen (z.B. Stolz und Huggel 2008). Die Verwendung von mindestens zwei unterschiedlichen Höhenmodellen geben einen wertvollen Beitrag zur Ergebnisinterpretation und Minimierung der Unsicherheiten.
- Die Begutachtung des Gebietes, insbesondere auch der potentiell gefährdeten Gebiete war trotz geringer Datenerhebung eine wertvolle und hilfreiche Komponente für die hier behandelte Risikoanalyse. Eine Analyse ohne eigenen visuellen Eindruck wäre noch erschwerter gewesen. Dies vermittelte die Erkenntnis, dass die Gebietskenntnis ein wichtiger Teil für eine Risikoanalyse ist und der Miteinbezug von lokalen Experten ein wesentlicher Bestandteil für eine erfolgreiche Risikoanalyse ist.
- Eine Analyse der Meteorodaten für das Jahr 1977 hätte eventuell interessante, hilfreiche Erkenntnis zur möglichen Ausbruchsbedingung geführt.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen zur Fragestellung sind:

- Für beide Seen besteht die Möglichkeit für einen Seeimpakt durch einen Eis-Felsabbruch. Das Potential steigt, falls die Seen sich weiter Ausdehnen und an Volumen gewinnen würden und unter anhaltendem Klimawandel.
- Der Gorelniksee weist momentan eine tiefe Ausbruchsgefährdung auf. Falls der See wieder an Volumen gewinnt, kann die Ausbruchsgefährdung mittel bis hoch eingestuft werden. Einen Eisabbruch und Impakt in den See wird als wahrscheinlichster Triggermechanismus für einen GLOF angesehen. Eine detailliertere Evaluation der Ausbruchsgefährdung und des Eisabbruches als Trigger wird hier als weiterer Schritt angesehen, falls der See an Volumen gewinnt. Der See Sovetov weist aktuell eine mittlere Ausbruchsgefährdung auf, die bei weiterer Volumenzunahme und unter anhaltenden klimatischen Veränderungen hoch ausfallen kann. Für diesen See wird der selbstverstärkenden rückschreitenden Erosion am Oberflächenabfluss durch Seespiegelerhöhung infolge intensiver Niederschläge oder Schmelzwasserinput das grösste Triggerpotential zugeschrieben. Der Ausbruch durch einen Eis-Felssturz beim See Sovetov steigt vor allem mit Blick auf die Zukunft bei weiterer Flächen-

und Volumenzunahme. Die Untersuchung des Moränendamms beim See Sovetov bezüglich Eisvorkommen wird als wichtiger weiterer Schritt für eine besser Abschätzung der Ausbruchgefährdung angesehen, insbesondere mit Blick auf die Zukunft.

- Die maximale Reichweite eines Gletscherseeausbruches liegt im Toleranzbereich zwischen Zusammenfluss mit dem Fluss Prochodnaja und dem Murenschutzdamm. Die Gefährdung besteht vor allem für die Kumbelbrücke, die Strassenabschnitte nahe am Flussbett und die Bereiche um das Flussbett, welche gerne als Picknickplätze oder ähnliches genutzt werden.
- Der Aufbau eines Frühwarnsystems oder mindestens der Monitoringkomponente wird hier als Möglichkeit der Risikominderung angesehen. Insbesondere, weil das Gebiet auch durch Niederschlagsmuren gefährdet ist, könnte ein Frühwarnsystem auch Prozessübergreifend nützlich sein.

Schlussendlich zeigte diese Arbeit bei ihrer Durchführung auch einige allgemeine und organisatorische Punkte auf, die für eine spätere Arbeit verbessert werden sollten beziehungsweise hier zu einer Verbesserung geführt hätten. Die Feldarbeit in einem weit entfernten Gebiet ist mit hohem organisatorischem Aufwand verbunden. Es muss damit gerechnet werden, dass nicht alles nach Plan läuft oder unter Umständen eine grössere Umplanung nötig ist. Diesbezüglich werden folgende Punkte als Verbesserung angesehen:

- Sinnvoll ergänzende Feldmessungen zu den geplanten Hauptmessungen für die Feldarbeit frühzeitig erstellen und eine präzisere Vorstellung, wie weiter vorgegangen werden soll, wenn die Datenerhebung im Feld nicht nach Plan verläuft.
- Mehr Zeit für die Feldarbeit einplanen, um vor Ort eine gewisse Flexibilität zu erhalten und vor Ort die Planung zu vervollständigen
- Bestehende sprachliche Barrieren erschweren die erfolgreiche Zusammenarbeit erheblich. Grundlegende Sprachkenntnisse oder eine Person, welche die Sprache beherrscht, sollte für die Feldarbeit vorhanden sein.

Der letzte Punkt war eine grosse Herausforderung in dieser Arbeit. Diese führte dazu, dass die Zusammenarbeit im Feld erschwert und auch die Verfügbarkeit der Literatur zum Untersuchungsgebiet stark eingeschränkt war. Im Sinne einer Einzelarbeit ohne grösserer eigener Erfahrungsgrundlage und stärkerer Zusammenarbeit mit lokalen Experten ergeben sich viele Unsicherheiten und Herausforderungen, welche die Aussagekraft der Resultate für die hier behandelte Fragestellung schwächten. Diesbezüglich zeigte sich während des Erstellens dieser Arbeit a) die Breite der miteinzubeziehenden Aspekte und Interdisziplinarität für eine fundierte, aussagekräftige Risikoanalyse für den Prozess Gletscherseeausbruch und c) dass für dieses Ziel die Kommunikation und der Austausch mit lokalen Experten sehr wichtig sind. Dies ist neben der Beantwortung der Fragestellung eine sehr wertvolle Erkenntnis. In diesem Sinne vermittelte diese Arbeit einen ersten Eindruck über die Möglichkeiten, Limiten und das Verbesserungspotential für eine Risikoanalyse eines GLOF im Untersuchungsgebiet und kann als Ausgangspunkt für eine durch Experten durchgeführte erweiterte und präzisere Risikoanalyse dienen.

## Literaturverzeichnis

- Aguilar MA**, Aguilar FJ, del Mar Saldana, Fernandes I (2012) Geopositioning Accuracy Assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*: 247-257.
- Aguilar MA**, del Mar Saldana M, Aguilar FJ (2013) Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 427-435.
- Aizen VB**, Kuzmichenok VA, Surazakov AB, Aizen EM (2007) Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data. *Global and Planetary Change* 56: 328-340.
- Andres N** (2010) Unsicherheiten von Digitalen Geländemodellen und deren Auswirkungen auf die Berechnung von Gletscherseeausbrüchen mit RAMMS. Masterarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. S113.
- Badoux A**, Graf C, Rhyner J, Kuntner R, McArdeLL BW (2009) A debris-flow alarm system for the alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural Hazards* 49: 517-539.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg)** (1998) Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien NR. 85, Naturgefahren. S 248.
- Bartelt P**, Salm B, Gruber U (1999) Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid modell with active/passive longitudinal straining. *Journal of Glaciology* 45 (150): 242-254.
- Bartelt P**, Buehler Y, Christen M, Deubelbeiss Y, Graf Ch, McArdeLL B, Salz M, Schneider M (2013) RAMMS User Manual v1.5, Debris Flow. WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung. S. 126.
- Basher R** (2006) Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. *Philosophical Transaction of Royal Society A* 364: 2167-2187.
- Blagovechshenskiy VP**, Yegorov AB (2009) The Ile Alatau Range Natural Hazards. Materials of the international conference on mitigation of natural hazards in mountain areas.S5.
- Bolch T**, Kamp U, Olsenholler J (2005) Using ASTER and SRTM DEMs for studying geomorphology and glaciation in high mountain areas. In: *New Strategies for European Remote Sensing*, Oluic (ed.), Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 003 X: 119-127.
- Bolch T** (2007) Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change* 56: 1-12.
- Bolch T**, Peters J, Yegorov A, Pradhan B, Buchroithner M, Blagovechshenskiy V (2011) Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59: 1691-1714.
- Bründl M**, Romang HE, Bischof N, Rheinberger CM (2009) The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. *Natural Hazard and Earth Systems Science* 9: 810-813.
- World Bank (WB)**, United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) and Central Asia Regional Economic Cooperation (CAREC) (2009) Central Asia and Caucasus Disaster Risk Management Initiative (CAC DRMI) - Risk Assessment for Central Asia and Caucasus, Desk Study Review. <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/11641>. P 155.

- Carey M**, Huggel Ch, Bury J, Portocarrero C, Haeberli W (2012) An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change* 112: 733-767.
- Clague JJ**, Evans SG, Blown IG (1985) A debris flow triggered by the breaching of a moraine-dammed lake, Klattasine Creek, British Columbia. *Canadian Journal Earth Science*, 22: 1492-1502.
- Clague JJ** und Evans SG (1994) Formation And Failure Of Natural Dams In The Canadian Cordillera. Geological Survey of Canada, Bulletin 464. S 33.
- Clague JJ**, Evans SG (2000) A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews* 19 (17-18): 1763-1783.
- Christen M**, Kowalski J, Bartelt P (2010) RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology* 63: 1-14.
- Costa JE**, Schuster RL (1988) The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin* 100: 1054-1068.
- Cruz RV**, Harasawa H, Lal M, Wu S, Anokhin Y, Punsalma B, Honda Y, Jafari M, Li C, Huu Ninh N (2007) Asia. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 469-506.
- Delvaux D**, Abdrakhmatov KE, Lenzin IN, Strom AI (2001) Landslides and Surface Breaks of the 1911 Ms 8.2 Kemin Earthquake (Kyrgystan). *Russian Geology and Geophysics* 42 (10): 1583-1592.
- Egli T** (2005) Wegleitung – Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Murgänge. VKF/AEAI. Kantonale Gebäudeversicherungen: 78-87.
- Eineder M**, Holzner (2000) Interferometric DEMs in Alpine Terrain – Limits and Options for ERS and SRTM. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International 7*: 3210-3212.
- Forkuor G**, Maathuis B (2012). Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models Over Two Regions in Ghana-Implications for Hydrological and Environmental Modelling. In: *Studies on Environmental and Applied Geomorphology*, Placentini T (Hrsg.): 220-240.
- Frey H**, Paul F (2012) On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18: 480-490.
- Fujisada H**, Baily BG, Kelly GG, Hara S, Abrams MJ (2005) ASTER DEM Performance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 43 (12): 2707-2713.
- Gardner AS**, Moholdt G, Cogley GJ, Wouters B, Arendt AA, Wahr J, Berthier E, Hock R, Pfeffer TW, Kaser G, Ligtenberg RM, Bolch T, Sharp MJ, Hagen JO, van den Broeke MR, Paul F (2013) A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. *Science* 340: 852-857.

- Graf Ch, McArdell BW** (2011) Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In Lambiel C, Reynard E, Scapozza C (Hrsg.) (2011) *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie: 245-257.
- Grasso VF** (2009) Early warning systems: State-of-art analysis and future directions. Draft report of United Nations Environment Programm (UNEP). S66.
- Hall O, Falorni G, Bras RL** (2005) Characterization and Quantification of Data Voids in the Shuttle Radar Topography Mission Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2 (2): 177-179.
- Hegglin E, Huggel Ch** (2008) An Integrated Assessment of Vulnerability to Glacial Hazards: A Case Study in the Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development* 28 (3-4): 299-309.
- Hengl T, Reuter HI** (Hrsg.) (2008) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science vol. 33, Elsevier. S772.
- Hirano A, Welch R, Lang H** (2003) Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57: 356-370.
- Hollenstein K, Hess J** (2011) Integrales Management von gravitativen Naturrisiken in der Schweiz. *Schweiz Z. Forstwe* 162 (12): 454-463.
- Horstmann B** (2004) Gletschersee-Ausbrüche in Nepal und der Schweiz – neue Gefahren durch den Klimawandel. Germanwatch, <http://germanwatch.org/de/2752>. S12.
- Huggel Ch, Kääh A, Haerberli W, Teyssere Ph, Paul F** (2002) Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 39 (2): 316-330. doi:10.1139/T01-099.
- Huggel Ch, Kääh A, Haerberli W, Krummenacher B** (2003) Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science* 3: 647-662.
- Huggel Ch, Haerberli W, Kääh A, Bieri D, Richardson Sh** (2004) An Assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 41: 1068-1083.
- Huggel Ch** (2004): Assessment of Glacial Hazards based on Remotes Sensing and GIS Modelling. *Schriftreihe Physische Geographie Glaziologie und Geomorphologie* 44. S75.
- Hussin HY, Quan Luna B, van Westen CJ, Christen M, Malet, JP, van Asch TWJ** (2012) Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Science* 12 (10): 3075–3090. doi:10.5194/nhess-12-3075-2012
- IPPC** (2012) Managing the risks of extreme events and disastersto advance climate change adaption. A special report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Field CB, Barros V, Stoker TF, Dahe Q, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner GK, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (Hrsgs.). Cambridge University Press, Cambridge UK, and New York NY USA. S 582.
- Jansky B, Sobr M, Engel Z** (2010) Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters* 40 (4): 358-364.

- Jansky B, Sobr M, Yerokhin S** (2006) Typology of high mountain lakes of Kyrgyzstan with regard to the risk of their rupture. *Limnological Review* 6: 135-140.
- Kääb A** (2005) Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep. Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie und Geomorphodynamik. S266.
- Kääb A, Huggel Ch, Fischer L, Guex S, Paul F, Roer I, Salzmann N, Schlaefli S, Schmutz K, Schneider D, Strozzi T, Weidmann Y** (2005) Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains : an overview. *Natural Hazards and Earth System Science* 5: 527–554.
- Kasatkin NE, Kapitsa VP** (2009) The Morainic Lakes Dynamics in The Ile Alatau. Materials of the international conference on mitigation of natural hazards in mountain areas. S4.
- Keiler M, Fuchs S** (2007) Das Risikokzept in der Naturgefahrenforschung. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co, KG, Berlin. S6.
- Kienholz H, Krummenacher B, Kipfer A, Perret S** (2004) Integrales Risikomanagement in der Praxis – Bemerkungen zum Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 3-4, 56. Jhg: 43-50.
- Kohler T, Maselli D** (Hrsg) (2009) Mountains and climate change - from understanding to action. Centre for Development and Environment (CDE), Universität Bern, [www.cde.bern.ch](http://www.cde.bern.ch), S 75.
- Keusen HR, Haemmig Ch, Bieri D, Huss M** (2013) Mit Satelliten gegen Flutwellen. Frühwarndienst für einen riesigen Gletschersee. *Die Alpen* (9): 57-60.
- Lentschke J** (2012) Bewertung des Gefährdungspotenzials von Muren infolge der Klimaänderung im Siedlungsraum des Ile Alatau (Südostkasachstan). Dissertation. Berlin, Humboldt-Universität. Mensch und Buch Verlag: ISBN 978-3-86387-387-5.
- Linsbauer A, Paul F, Haeberli W** (2012) Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research* 117: S17.
- Marchenko SS, Gorbunov AP, Romanovsky VE** (2007) Permafrost warming in the Tien Shan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change* 56: 311-327.
- McKillop RJ, Clague JJ** (2006) A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Natural Hazards*, 41(1): 131-157. doi:10.1007/s11069-006-9028-7.
- McKillop RJ, Clague JJ** (2007) Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, 56 (1-2): 153-171.
- Mergili M, Schneider JF** (2011) Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Natural Hazards Earth System Science*, 11: 1447-1462.
- Mergili M, Schneider D, Worni R, Schneider JF** (2011) Glacial Lake Outburst Floods In The Pamir Of Tajikistan: Challenges In Prediction And Modelling. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment – Book*: S 973-982. DOI: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-106.

- Mool PK** (1995) Glacier Lake Outburst Floods in Nepal. *Journal of Nepal Geological Society* 11: 273-280.
- Narama Ch**, Kääh A, Duishonakunov M, Abdrakhmatov K (2009a) Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global and Planetary Change*. S13.
- Narama Ch**, Severskiy I, Yegorov A (2009b) Current State of Glacier Changes, Glacial Lakes, and Outburst Floods in the Ile Ala-Tau and Kungöy Ala-Too Ranges, Northern Tien Shan Mountains. *Geographical Studies* 84: 22.32
- Nikolakopoulos KG**, Kamaratakis EK, Chrysoulakis N (2006) SRTM vs. ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing* 27 (21): 4819 - 4838.
- Nuth C**, Kääh A (2011) Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere* 5: 271-290.
- Noetzli J**, Huggel Ch, Hoelzle M, Haeberli W (2006) GIS-based modelling of rock-ice avalanches from Alpine permafrost areas. *Computational Geoscience* 10 (2): 161-178.
- Nussbaumer S**, Schaub Y, Huggel C, Walz A (2014) Risk estimation for future glacier lake outburst floods based on local land-use changes. *Natural Hazards and Earth System Science* 14: 1611-1624.
- OcCC**, ProClim (Hrsg) (2007) *Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*. S168.
- Paul F**, Linsbauer A (2012) Modelling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines, and a DEM. *International Journal of Geographical Information Science* 26 (7): 1173-1190.
- Peters J** (2009) Identifizierung und Kartierung potentiell gefährlicher Gletscherseen im nördlichen Tien Shan auf Basis von multi-temporalen Fernerkundungsdaten. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden. S99.
- Quan Luna B**, Blahut J, van Westen CJ, Sterlacchini S, van Asch TWJ, Akbas SO (2011) The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7): 2047–2060. doi:10.5194/nhess-11-2047-2011.
- Quincey DJ**, Richardson SD, Luckman A, Lucas RM, Reynolds JM, Hambrey MJ, Glasser NF (2007) Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets. *Global and Planetary Change*, 56(1-2): 137–152. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.013.
- Rana B**, Shrestha AB, Reynolds JM, Aryal R, Pokhrel AP, Budhathoki KP (2000) Hazard assessment to the Tsho Rolpa Glacier Lake and ongoing remediation measures. *Journal of Nepal Geological Society*, 22: 563-570.
- Reuter HI**, Nelson A, Jarvis A (2007) An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science* 21 (9): 983-1008.
- Reynolds JM** (1999) Glacial hazard assessment at Tsho Rolpa, Rolwaling, Central Nepal. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32: 209-214.

- Richardson SD**, Reynolds JM (2000b) An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International* 65/66: 31-47.
- Rickenmann D** (1999) Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards* 19: 47-77.
- Rickenmann D**, Weber D, Stepanov B (2003) Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In: Rickenmann und Chen (Hrsg) *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanism, Prediction, and Assessment*. Millpress, Rotterdam, ISBN 90 77017 78 X: 883-894.
- Rickenmann D** (2005) Runout prediction methods. In: Jakob M, Hungr O (eds) *Debris flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis, Springer Berlin Heidelberg. 305-321.
- Romang H**, Bründl M (2009): Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden. Teil B: Anwendung des Risikokzept: Prozess Murgang. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT. S 38.
- Salzmann N**, Käab A, Huggel Ch, Allgöwer B, Haeberli W (2004) Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography* 58: 74-84.
- Schaub Y**, Haeberli W, Huggel Ch, Künzler M, Bründl M (2013) Landslides and New Lakes in Deglaciating Areas: A Risk Management Framework. In: Margottini et al. (Hrsg) *Landslide Science and Practice 7*: 31-38. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schneider D**, Bartelt P, Caplan-Auerbach J, Christen M, Huggel Ch, McArdeil BW (2010) Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recording and a numerical avalanche model. *Journal of Geophysical Research* 115. S20.
- Stolz A** und Huggel Ch (2008) Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size in modelling results. *Landslides* 5 (3): 311-319. doi:10.1007/s10346-008-0125-4.
- Stricker B** (2010) Murgänge im Torrente Riascio (TI): Ereignisanalyse, Auslösefaktoren und Simulationen von Ereignissen mit RAMMS. Masterarbeit Geographisches Institut Universität Zürich. S 110.
- Sorg A**, Bolch T, Stoffel M, Solomina O, Beniston M (2012) Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature climate change*: 1-7. doi: 10.1038/NCLIMATE1592.
- World Glacier Monitoring Service (WGMS)** (2008): *Global Glacier Changes: facts and figures*. Zemp M, Roer I, Käab A, Hoelzle M, Paul F, Haeberli W (Hrsg.), UNEP, World Glacier Monitoring Service: S88.
- Yegorov A** (2007) Analyse und Bewertung von Naturgefahren als Grundlage für ein nachhaltiges Naturgefahrenmanagement in Gebirgssystemen SO-Kasachstans am Beispiel des Ile-Alatau. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig – Maximilians - Universität München. S 113.
- Van Westen CJ**, van Asch TWJ, Soeters R (2006) Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering geology and the Environment* 65 (2): 167-184.
- Vilimek V**, Emmer A, Huggel Ch, Schaub Y, Würmli S (2014) Database of glacial lake outburst floods (GLOFs) – IPL Project No .179. *Landslides* 11: 161-165.

- Vilimek V**, Zapata ML, Klimes J, Patzelt K, Santillán N (2005) Influence of glacial retreat in natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides* 2: 107-115.
- Walder JS**, O'Connor JE (1997) Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*, 33 (10): 2337-2348.
- Wang X**, Liu S, Guo W, Xu J (2008) Assessment and Simulation of Glacier Lake Outburst Floods for Longbasaba and Pida Lakes, China. *Mountain Research and Development*, 28 (3): 310–317. doi:10.1659/mrd.0894.
- Wang X**, Liu S, Ding Y, Guo W, Jiang Z, Lin J, Han Y (2012a) An approach for estimating the breach probabilities of moraine-dammed lakes in the Chinese Himalayas using remote-sensing data. *Natural Hazards Earth System Science*, 12: 3109-3122.
- Wang W**, Yang X, Yao T (2012b) Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet. *Hydrological Processes* 26: 213-225.
- Wang X**, Ding Y, Liu S, Jiang L, Wu K, Jiang Z, Guo W (2013) Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. *Environmental Research Letters* 8: 11 pp. [iopscience.iop.org](http://iopscience.iop.org).
- Werder MA**, Bauder A, Funk A, Keusen HR (2010) Hazard assessment investigations in connection with the formation of a lake on the tongue of Unterer Grindelwaldgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Science* 10: 227-237.
- Westoby MJ**, Glasser NF, Brasington J, Hambrey MJ, Quincey DJ, Reynolds JM (2014) Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. *Earth-Science Reviews* 134: 137-159.
- Worni R**, Huggel Ch, Stoffel M (2013) Glacial lakes in the Indian Himalayas – From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modelling based risk assessment of critical glacial lakes. *Science of the Total Environment* 468-469: 71-84.
- Worni R**, Huggel Ch, Clague JJ, Schaub Y, Stoffel M (2014) Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modelling perspective. *Geomorphology* 224: 161-176.
- Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL** (2006) Information zu: „Murgang“ (Mure, Rufe). S 4.
- Yao X**, Liu S, Sun M, Wei J, Guo W (2012) Volume calculation and analysis of the changes in moraine dammed lakes in the north Himalaya: a case study of Longbasaba lake. *Journal of Glaciology* 58 (210): 753-760.
- Zschau J**, Küppers NA (Hrsg) (2003) Early warning systems for natural disaster reduction. Springer, Berlin. S834.

### **Internetseiten**

ASTER GDEM Version 2: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/1.html> (Abfrage: 15.12.14)

Glacial Lake Outburst Floods Database : <http://glofs-database.org/> (Abfrage 26.01.2015)

Global Terrestrial Network for Permafrost GTN-P: <http://gtnp.arcticportal.org/> (Abfrage 26 .01.2015)

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT: <http://www.planat.ch/> (Abfrage 22.12.2014)

World Glacier Monitoring Service WGMS: <http://www.wgms.ch/fog.html> (Abfrage 16.02.2015)

## Anhang



Anhang 1: Murenschutzdamm beim Wasserkraftwerk mit sichtbaren Schäden (z.B. bei roter Markierung) durch Murgänge. Die Höhe der Murgänge erreicht daher durchaus mehrere Meter. (eigene Aufnahme)



Anhang 2: Steile Murgangrinne oberhalb der Kumbelbrücke mit sichtbaren Erosionshöhen von vergangenen Murgängen. (eigene Aufnahme)



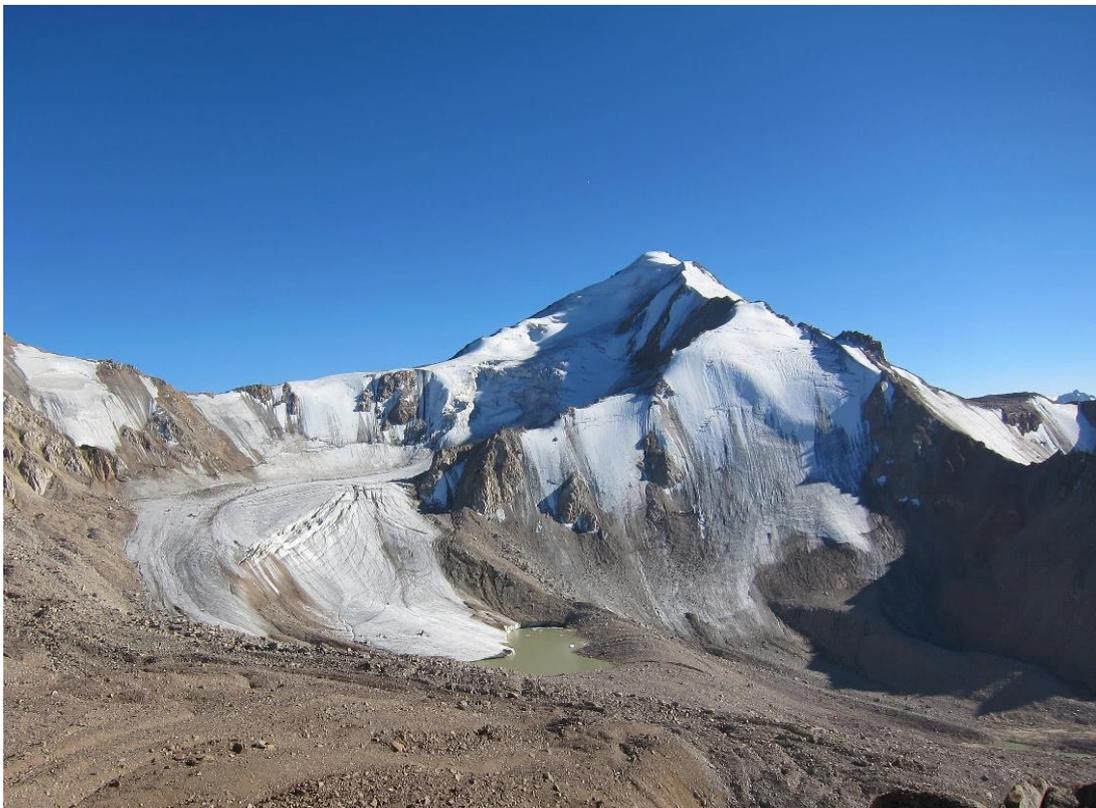
Anhang 3: Unterer Teil des Untersuchungsgebietes im verbreiterten Tal mit Ablagerungen ehemaliger Murgänge. (eigene Aufnahme)



Anhang 4: Flacher Bereich im oberen Teil des Untersuchungsgebiets bis zum Übergang zur steilen Murgangrinne (rote Markierung). (eigene Aufnahmen)



Anhang 5: Brücke, welche den Kumbelbach überquert und zum grossen Almatinka See führt. (eigene Aufnahme)



Anhang 6: See Sovetov und Umgebung. (eigene Aufnahme)



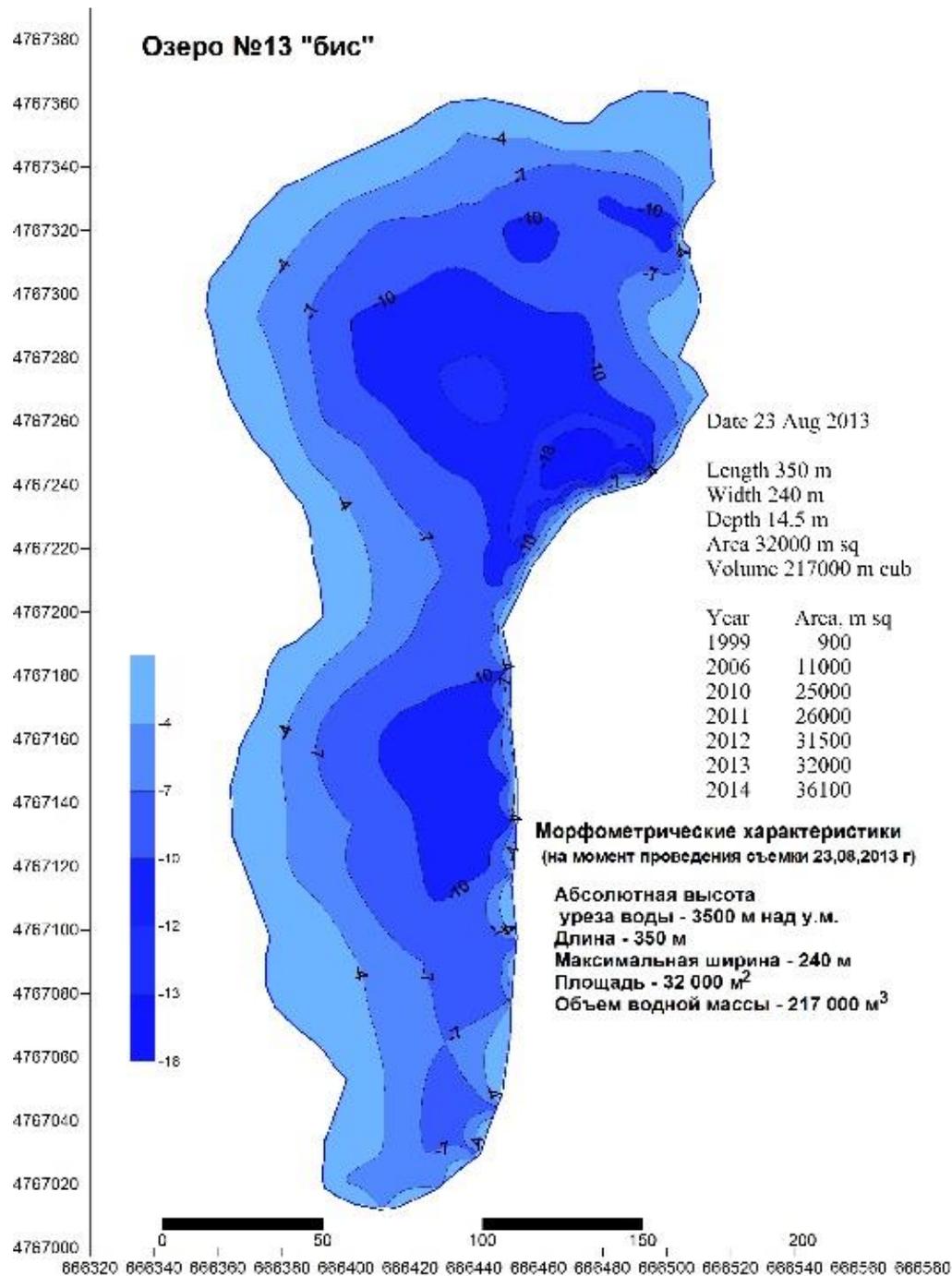
Anhang 7: Oberflächenabfluss vom See Sovetov zu den beiden Reliktseen im Seebecken des ehemaligen Gletschersees, der 1977 ausgebrochen ist. Im Oberflächenabflusskanal sind zwei Abflussröhren gelegt zur Seespiegelabsenkung. (eigene Aufnahme)



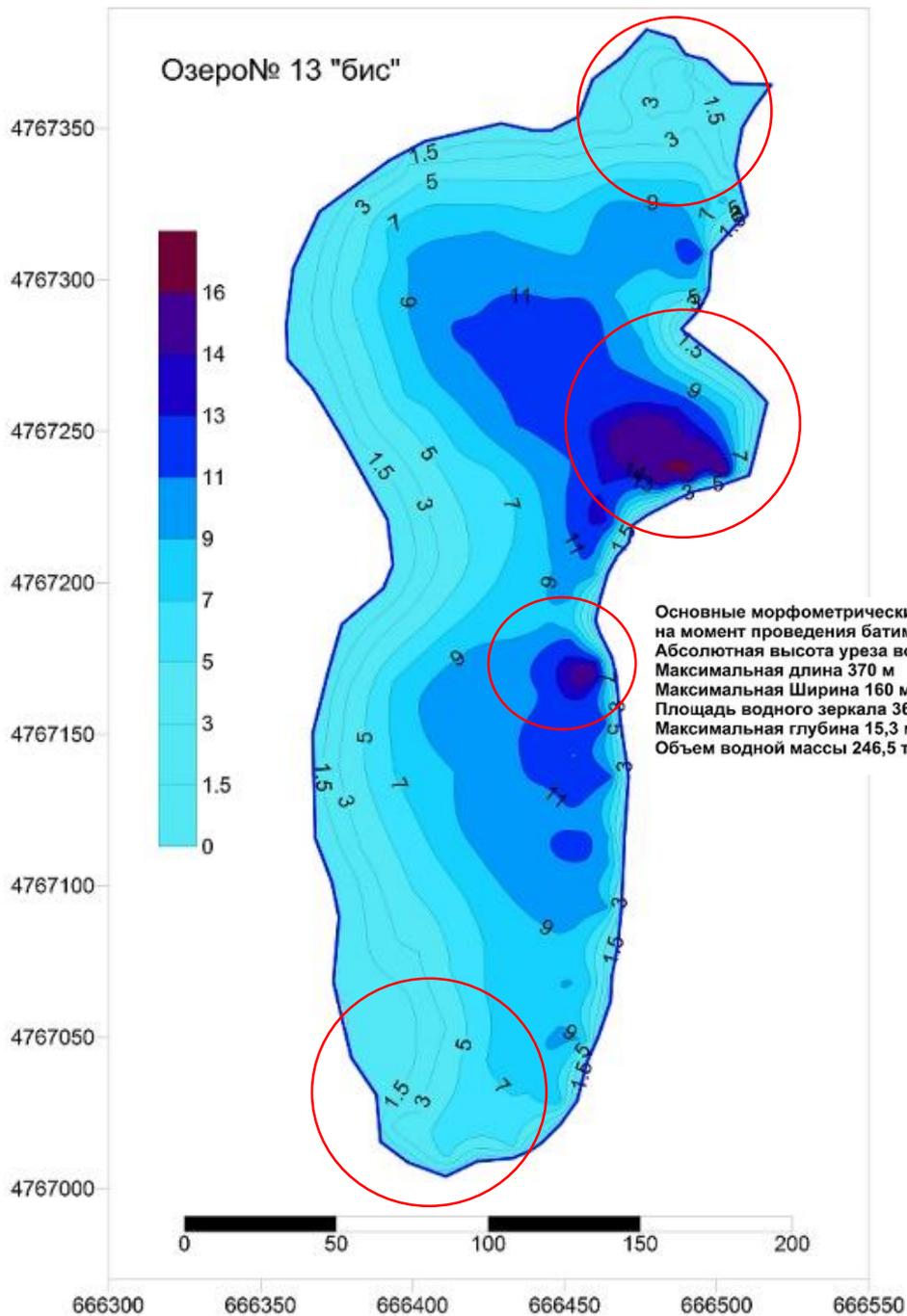
Anhang 8: Gorelniksee mit dem als anfälligsten beurteilten Bereich im Moränenwall für einen Ausbruch (gelbe Markierung) und dem Hängegletscher oberhalb des Sees (rote Markierung). (eigene Aufnahme)



*Anhang 9: Hangrutschungen mit austretendem Wasser unterhalb des ehemaligen Gletschersees, der 1977 ausgebrochen ist, deuten auf degradierendes Eis im Untergrund hin. (eigene Aufnahme)*

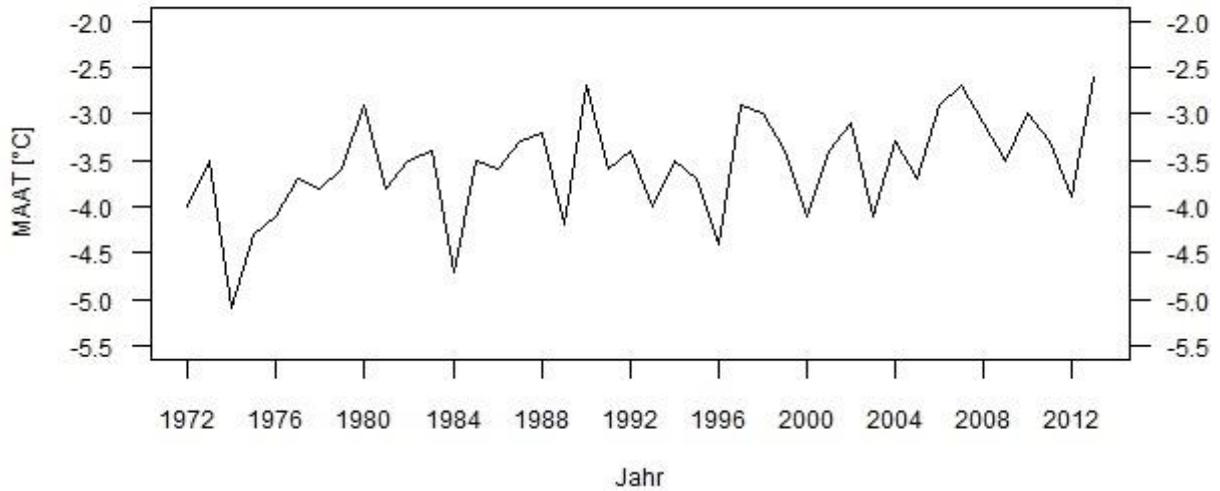


Anhang 10: Bathymetrische Vermessung des See Sovetov durch das Geographische Institut der Republik Kasachstan im Jahr 2013 (oben) und 2014 (nächste Seite). Der Vergleich der beiden Jahre lassen auf vier Bereiche (rote Markierung Vermessung 2014) schliessen, wo der See in Veränderung ist.



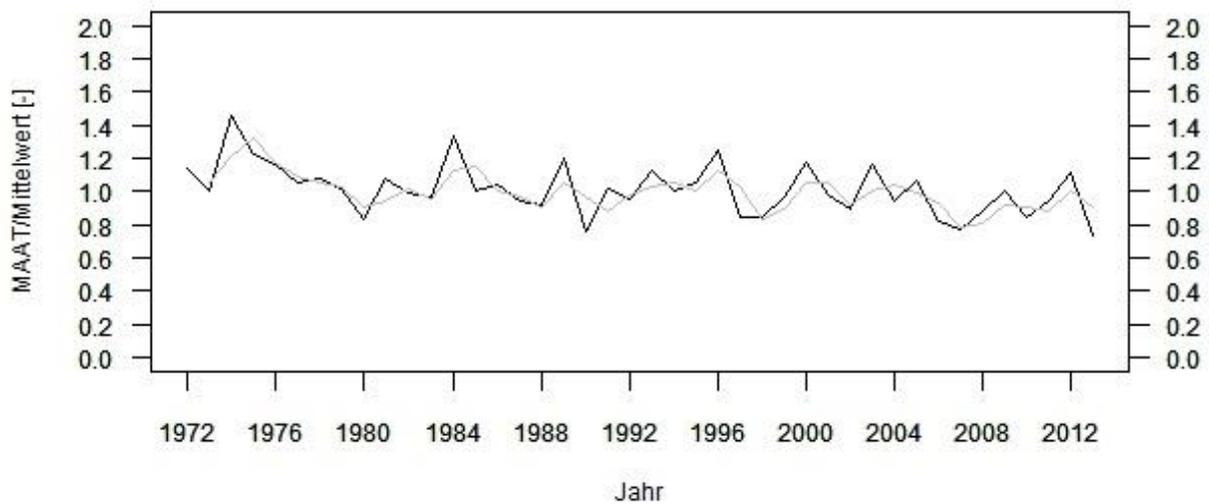
a)

MAAT 1972-2013



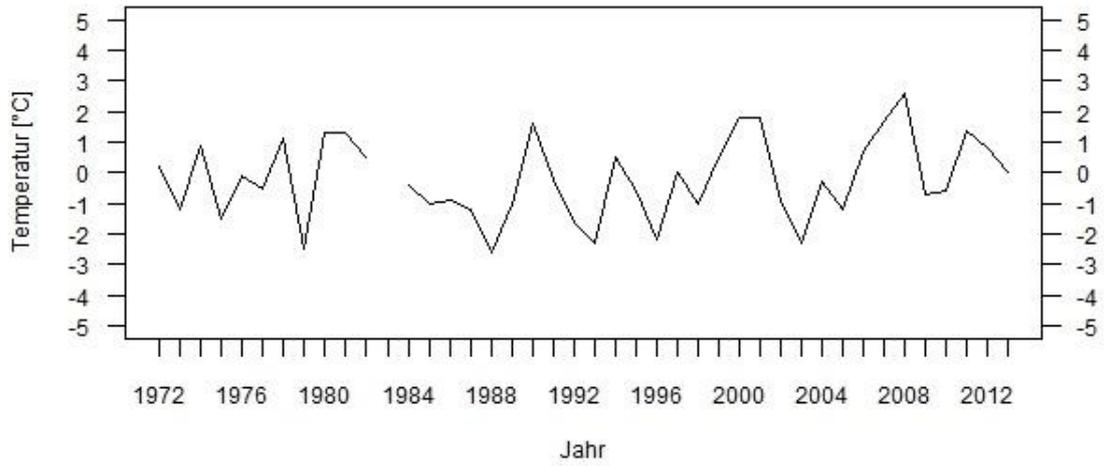
b)

MAAT standardisiert 1972-2013

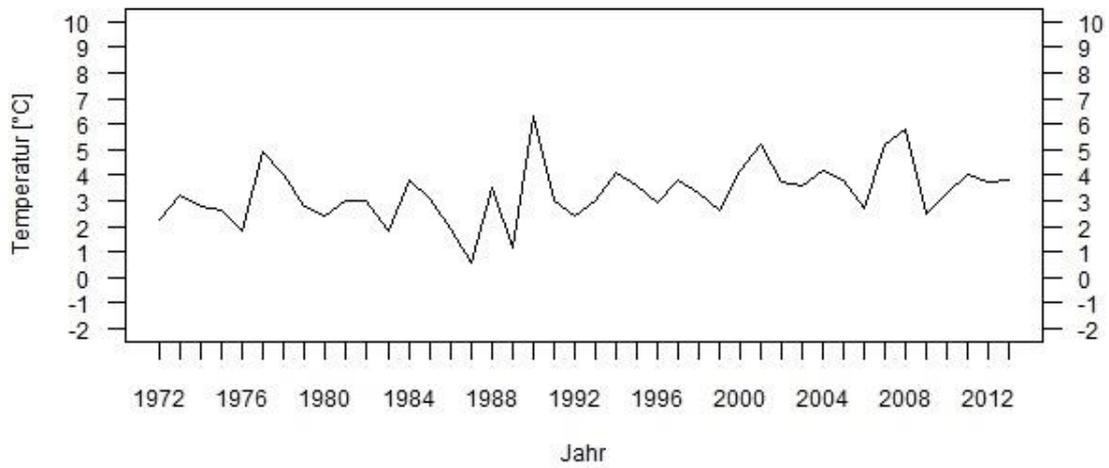


Anhang 11: Mittlere jährliche Lufttemperatur (MAAT = Mean Annual Air Temperatur) für die Klimastation Tuyuksu im Nachbarfel des Kumbeltales für die Zeitspanne 1972-2013. a) Die mittlere jährliche Lufttemperatur zeigt einen klaren positiven Anstieg b) die über den Mittelwert der gesamten Zeitspanne standardisierten Werte der mittleren jährlichen Lufttemperatur zeigen, dass das Mittel nicht konstant ist und die mittlere jährliche Lufttemperatur steigt. In b) abgebildet sind die pro Jahr standardisierten (schwarz) und die mit dem Mittelwert standardisierte Zweijahressumme (grau). (eigene Auswertung)

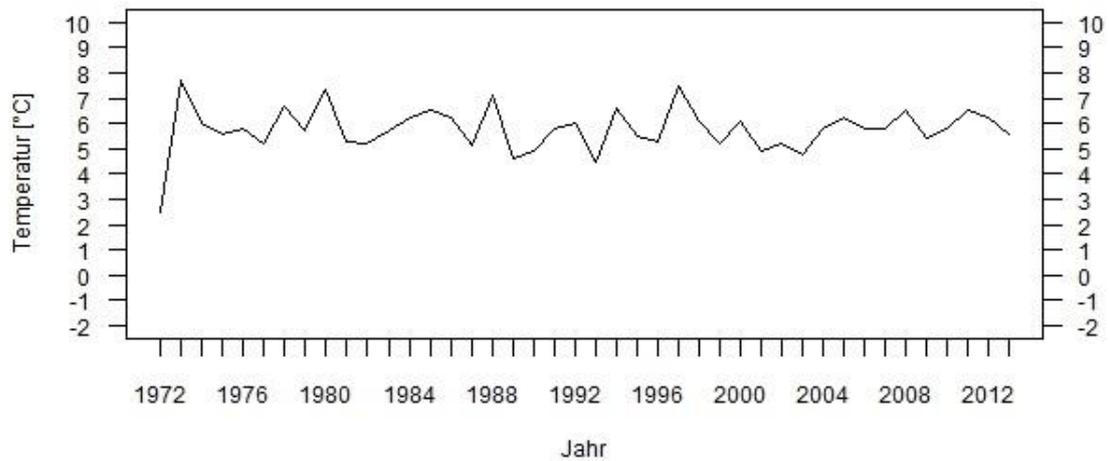
Temperatur Monatsmittel im Mai 1972-2013



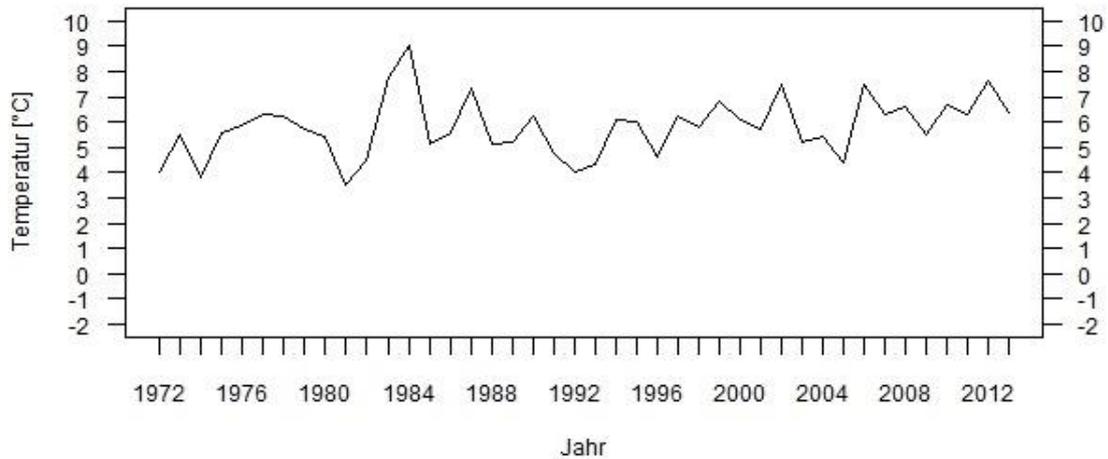
Temperatur Monatsmittel im Juni 1972-2013



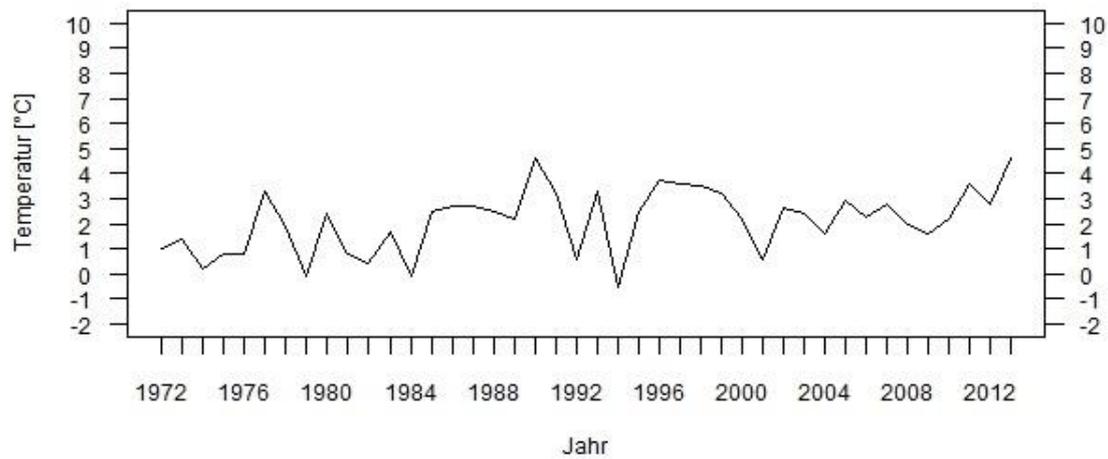
Temperatur Monatsmittel im Juli 1972-2013



**Temperatur Monatsmittel im August 1972-2013**

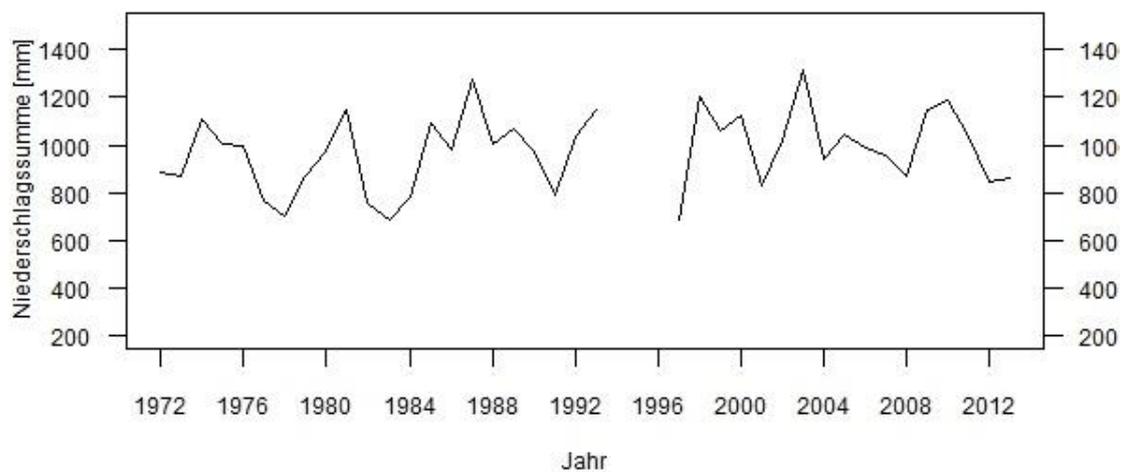


**Temperatur Monatsmittel im September 1972-2013**



Anhang 12: Monatsmittel der Temperaturen der Monate Mai-September für die Zeitspanne 1972-2013 für die Klimastation Tuyuksu im Nachbartal des Kumbeltales. Alle zeigen einen positiven Trend. Dabei ist der Trend vor allem im September und auch im August am stärksten. (eigene Auswertung)

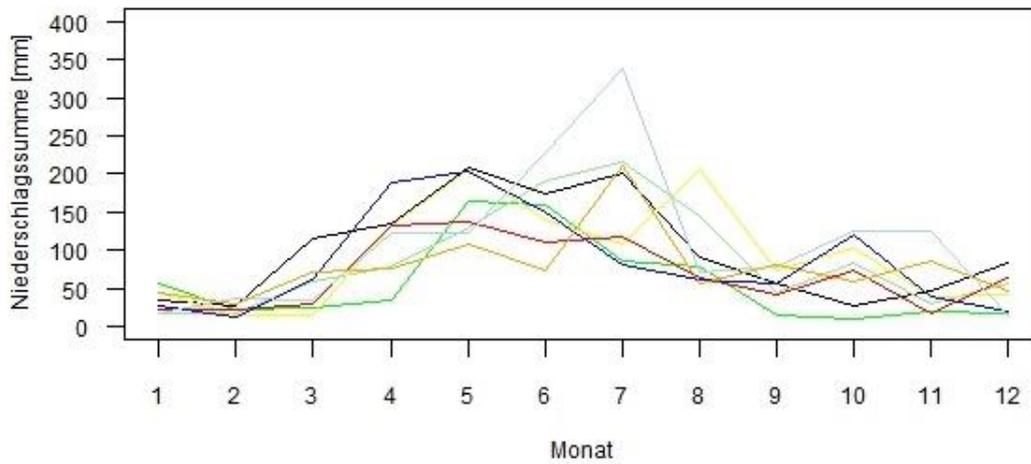
**Jährliche Niederschlagssumme 1972-2013**



Anhang 13: Jährliche Niederschlagssumme für die Klimastation Tuyuksu für die Zeitspanne 1972-2013 (Datenlücke 1994-1995). Es zeigt sich kein klarer Trend über diese Zeitspanne. (eigene Auswertung)

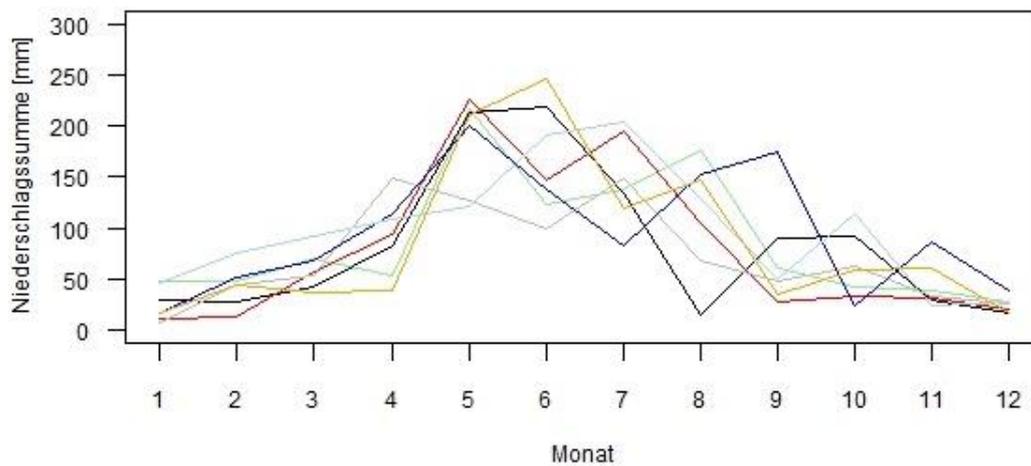
a)

Monatsweise Niederschlagssumme von 1997-2007



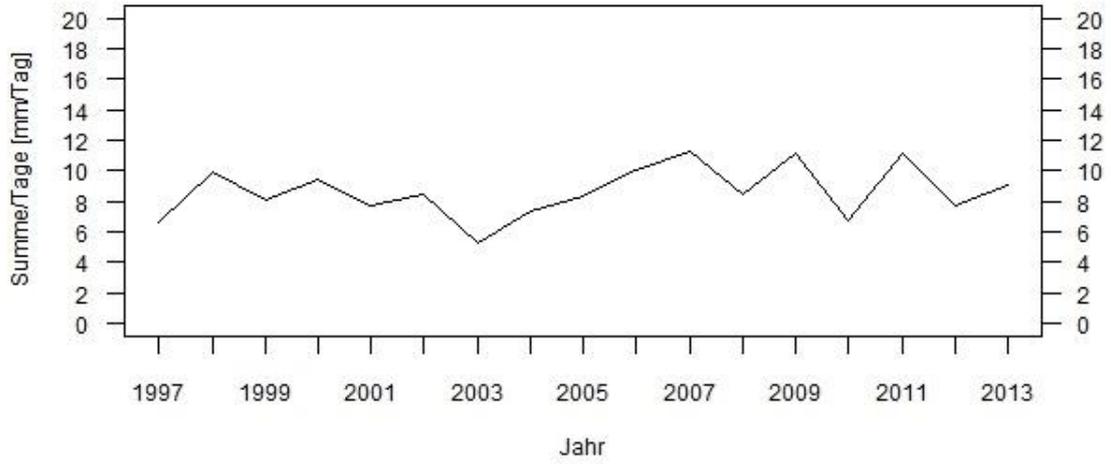
b)

Monatsweise Niederschlagssumme von 2007-2013

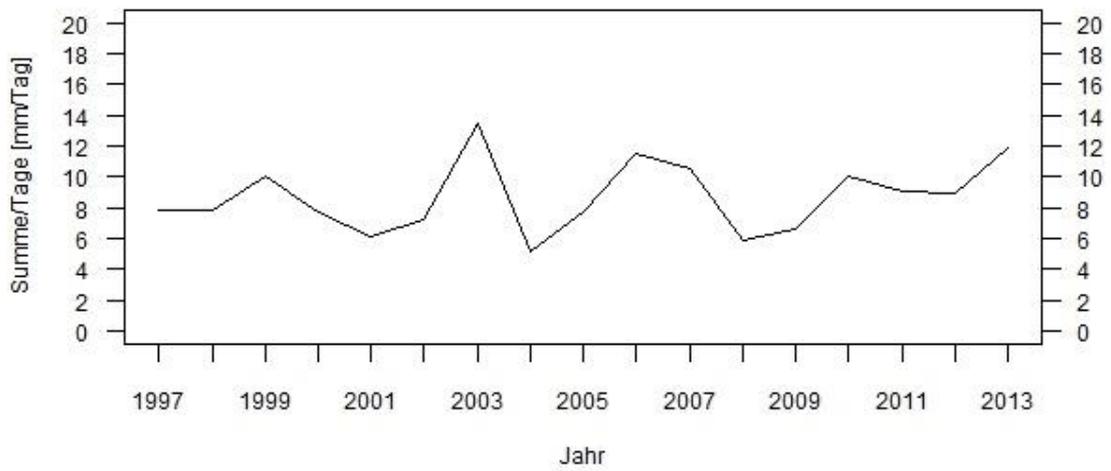


Anhang 14: Niederschlagsverteilung über das Jahr pro Monat für die Klimastation Tuyuksu für die Zeitspanne a) 1997-2007 b) 2007-2013. Ersichtlich ist eine jährliche zum Teil starke Schwankung aber generell zeigen sich die zwei Hauptmaxima im frühen Sommer und Herbst sowie die beiden Minima im Winter und Sommer. (eigene Auswertung)

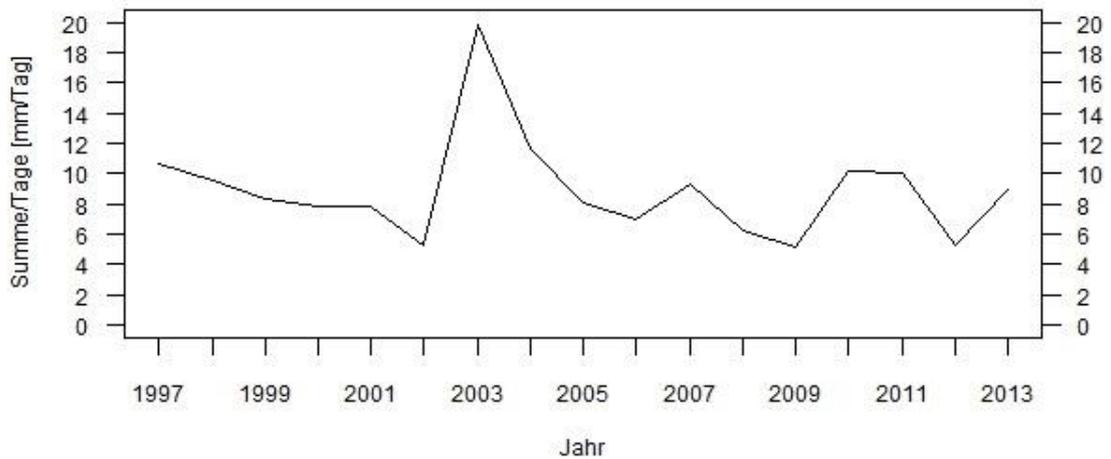
Verhältnis Niederschlagssumme zu -tage im Monat Mai 1997-2013



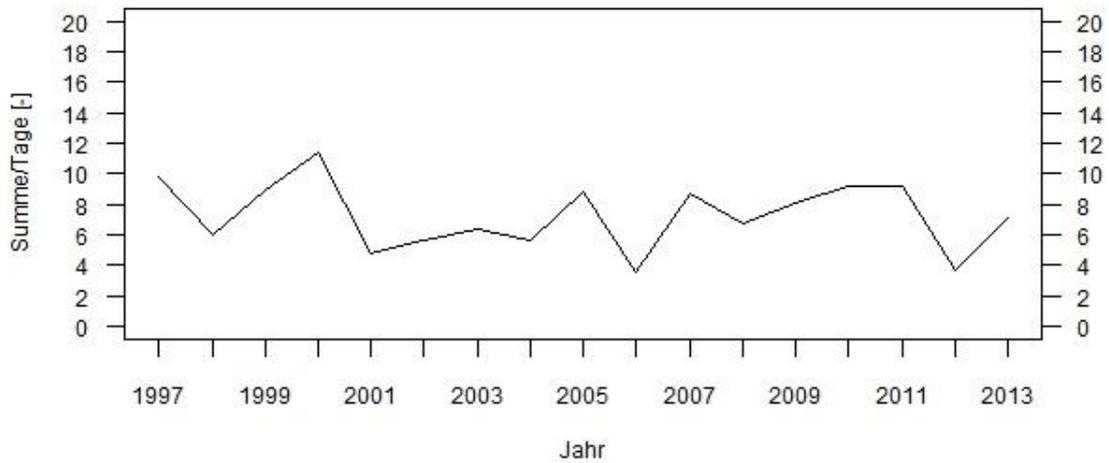
Verhältnis Niederschlagssumme zu -tage im Monat Juni 1997-2013



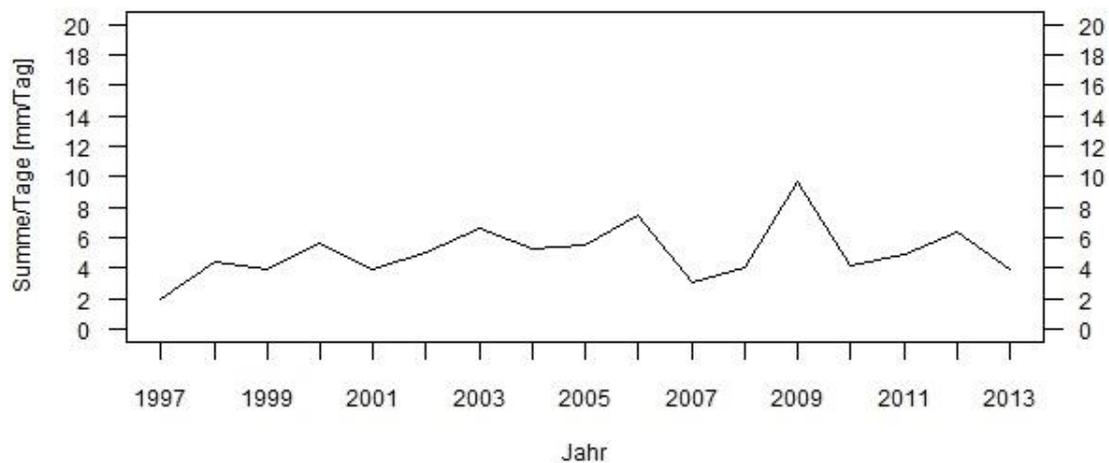
Verhältnis Niederschlagssumme zu -tage im Monat Juli 1997-2013



Verhältnis Niederschlagssumme zu -tage im Monat August 1997-2013

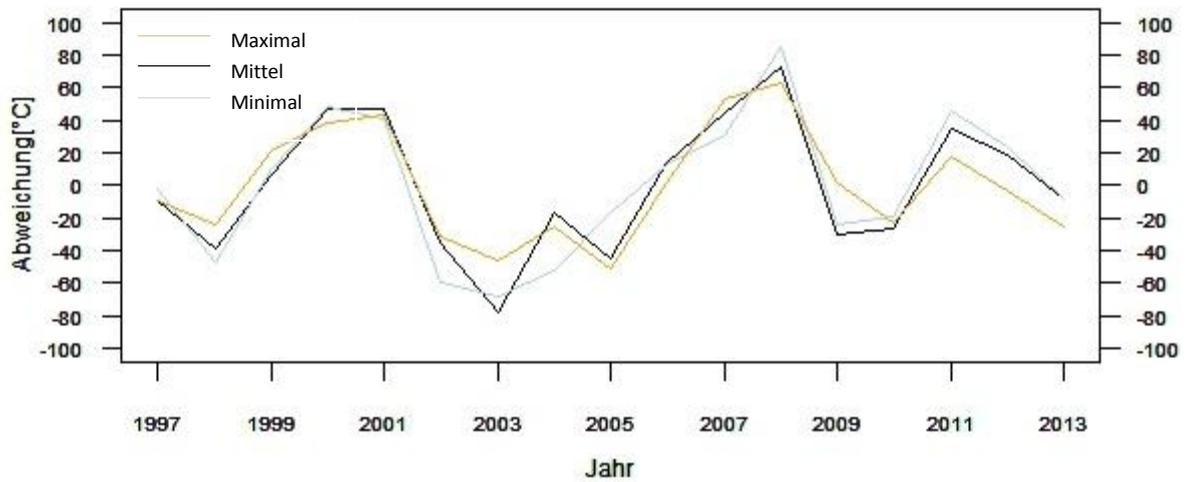


Verhältnis Niederschlagssumme zu -tage im Monat September 1997-2013

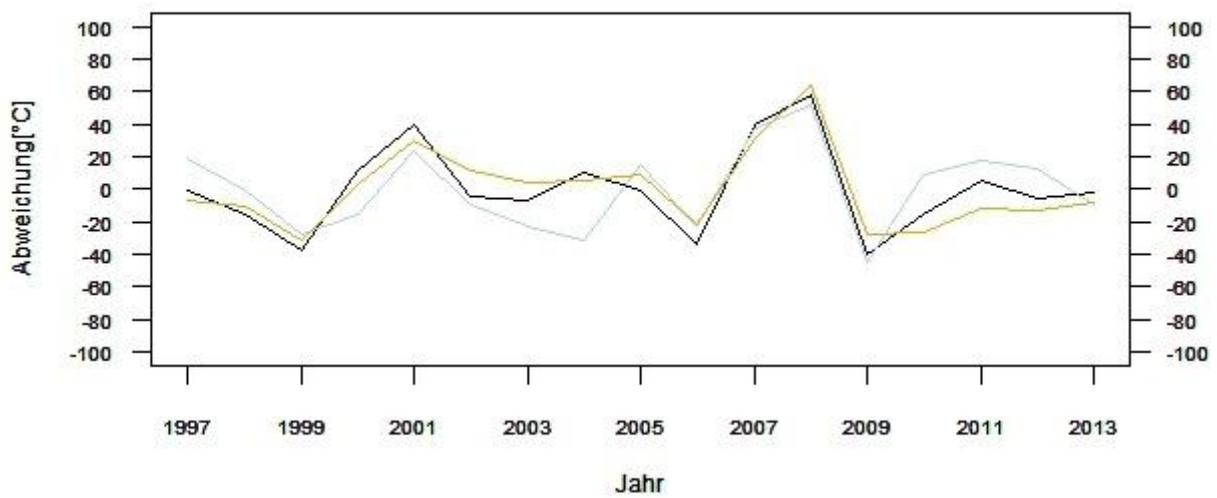


Anhang 15: Das Verhältnis von Niederschlagssumme zu Niederschlagstage für die Monate Mai-September für die Zeitspanne 1997-2013 für die Klimastation Tuyuksu im Nachbartal des Kumbeltales. Dies kann Aufschluss zu Intensitätsänderungen im Niederschlagsverhalten geben. Dies ist wichtig bei der Abschätzung der Ausbruchsgefährdung der Gletscherseen. Es wird jedoch kein klarer Trend für alle Monate beobachtet. Die Zeitspanne ist jedoch relativ kurz. (eigene Auswertung)

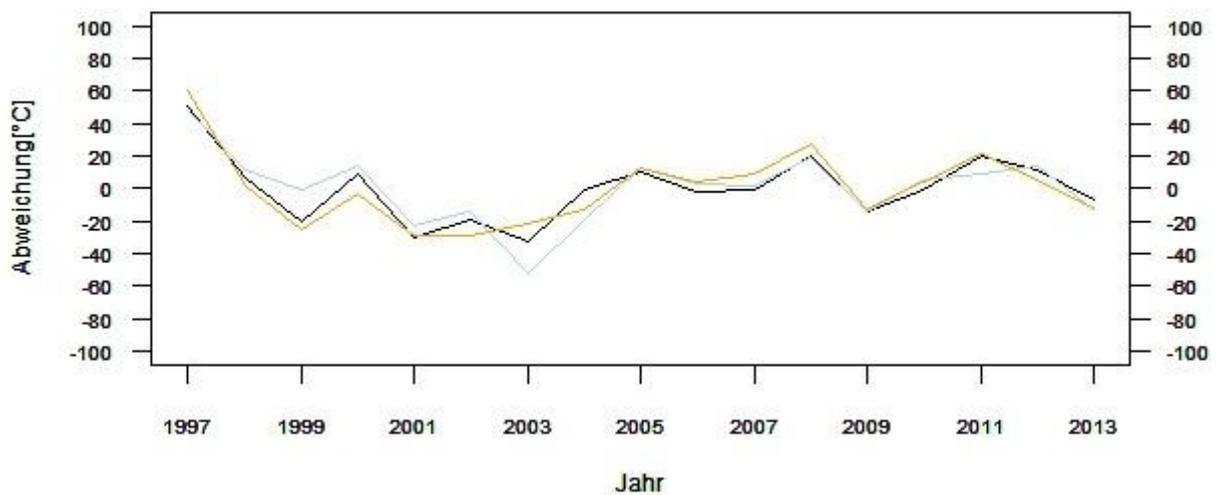
Abweichung der summierten Gradtage vom Mittel im Monat Mai von 1997-2013



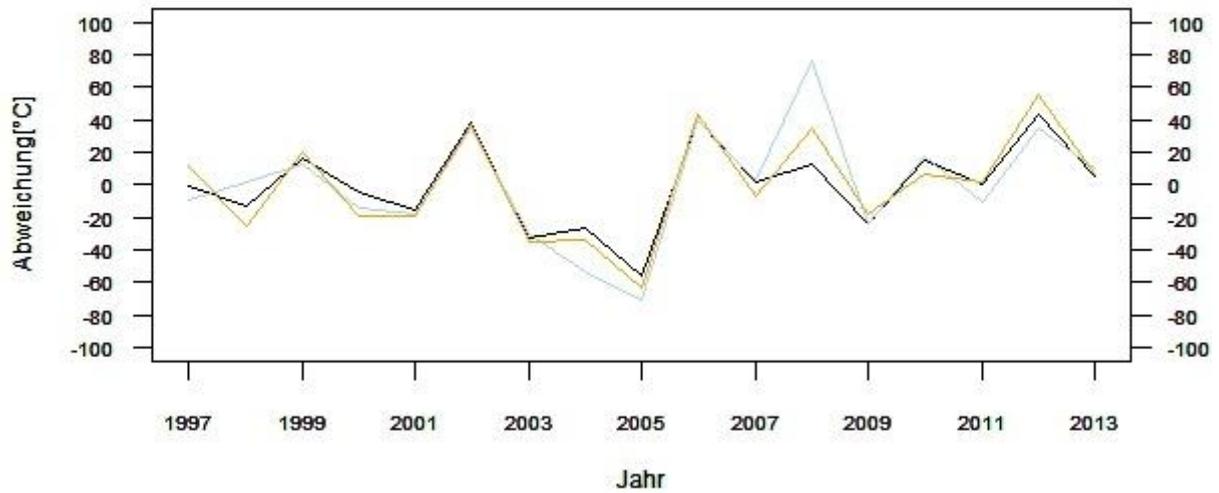
Abweichung der summierten Gradtage vom Mittel im Monat Juni von 1997-2013



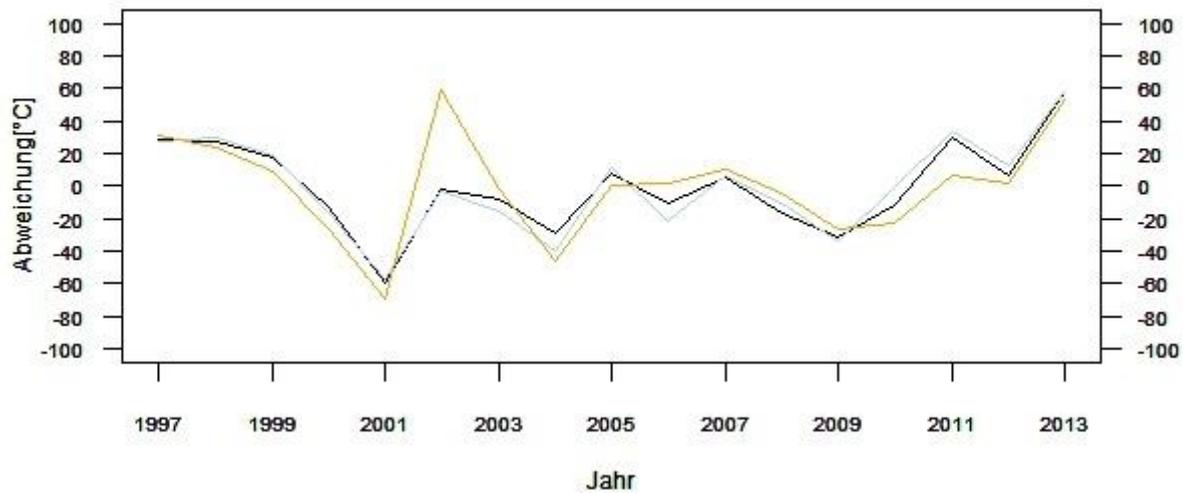
Abweichung der summierten Gradtage vom Mittel im Monat Juli von 1997-2013



Abweichung der summierten Gradtage vom Mittel im Monat August von 1997-2013

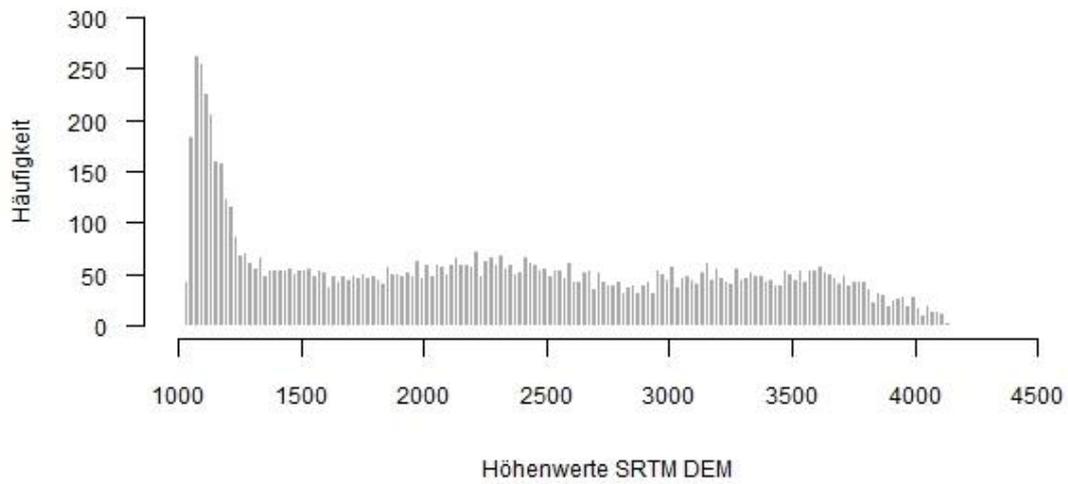


Abweichung der summierten Gradtage vom Mittel im Monat September von 1997-2013

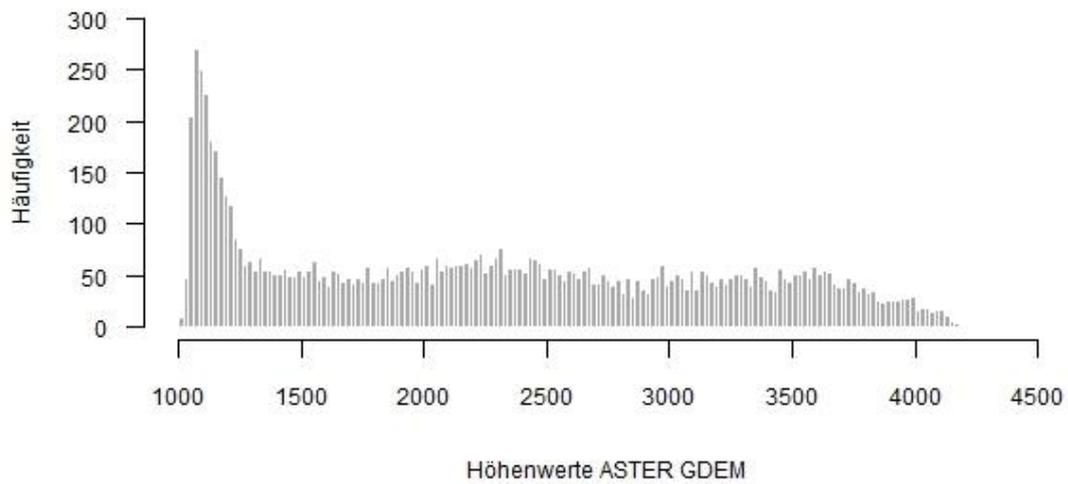


Anhang 16: Abweichung der pro Monat summierten Gradtage der Monate Mai-September für die Zeitspanne 1997-2013 für die Klimastation Tuyuksu im Nachbartal des Kumbeltales. Dies kann Aufschluss auf mögliche Permafrostdegradation und mögliche verstärkte negative Massenbilanz der Gletscher geben. Dies ist wichtig für die Abschätzung der Ausbruchgefährdung und Seeentwicklung mit Blick in die Zukunft. Ein Trend ist über dies kurze Zeitspanne nicht beobachtbar. Abgebildet sind die minimalen (grau), mittleren (schwarz) und maximalen (braun) Summen der Gradtage. (eigene Auswertung)

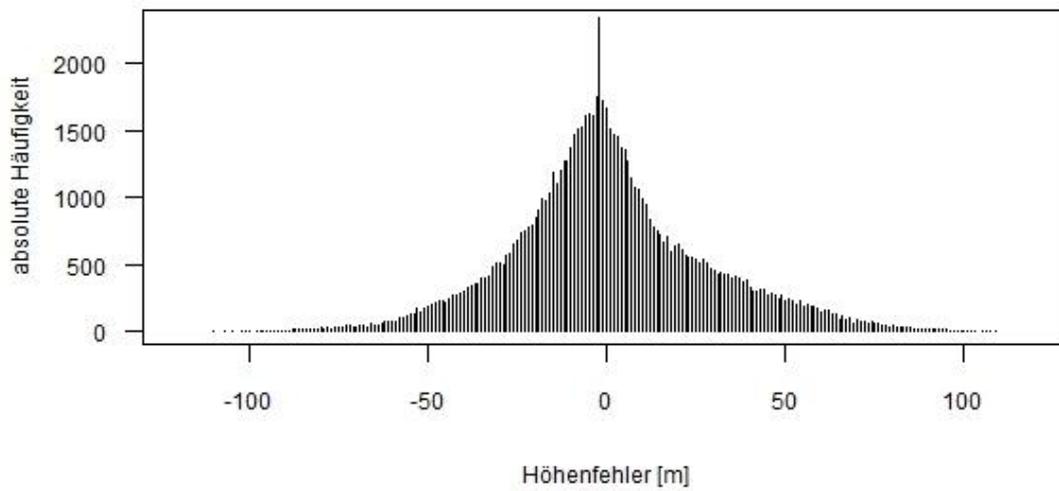
a) **Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte im SRTM DEM**



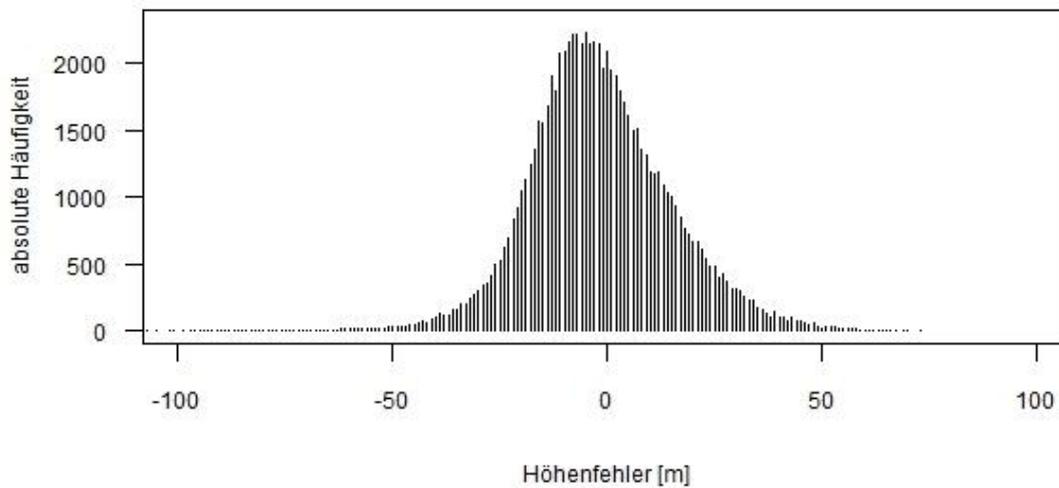
b) **Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte im ASTER GDEM**



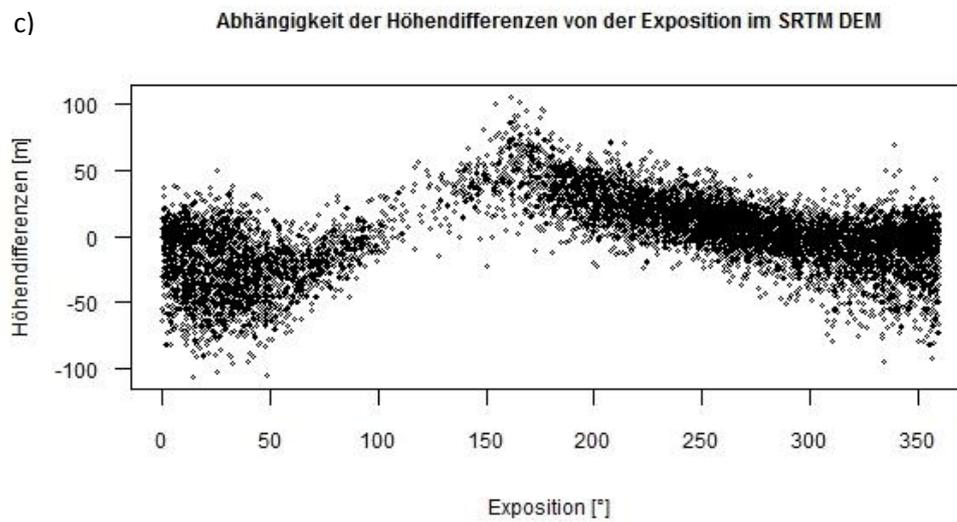
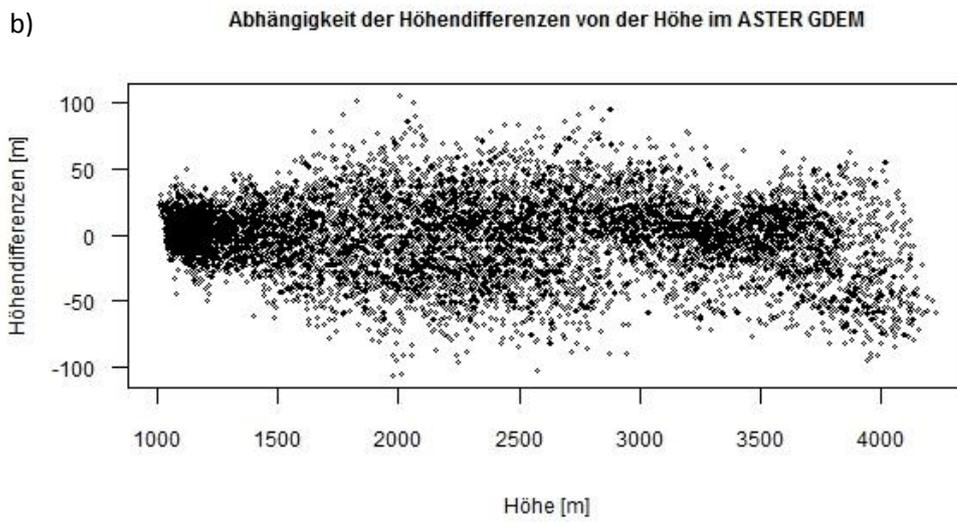
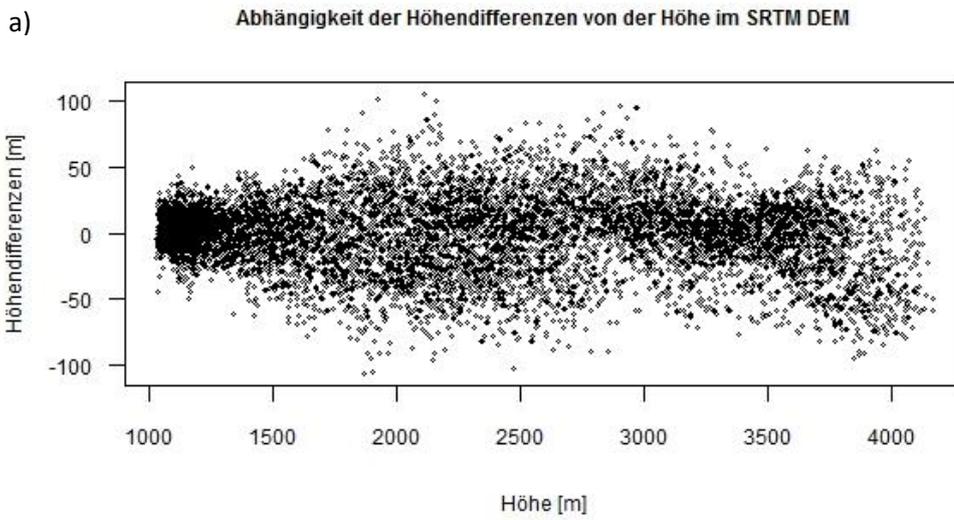
c) **Höhenfehler zwischen GDEM und SRTM DEM**

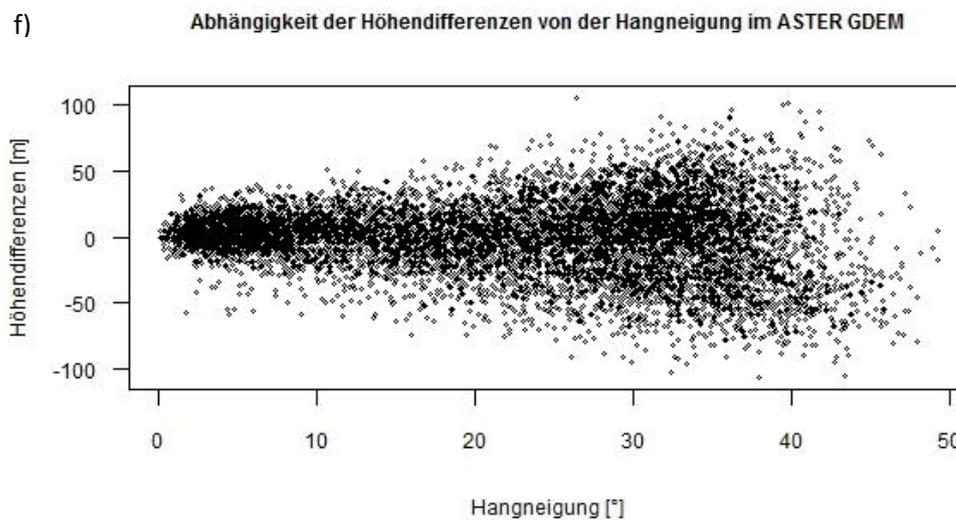
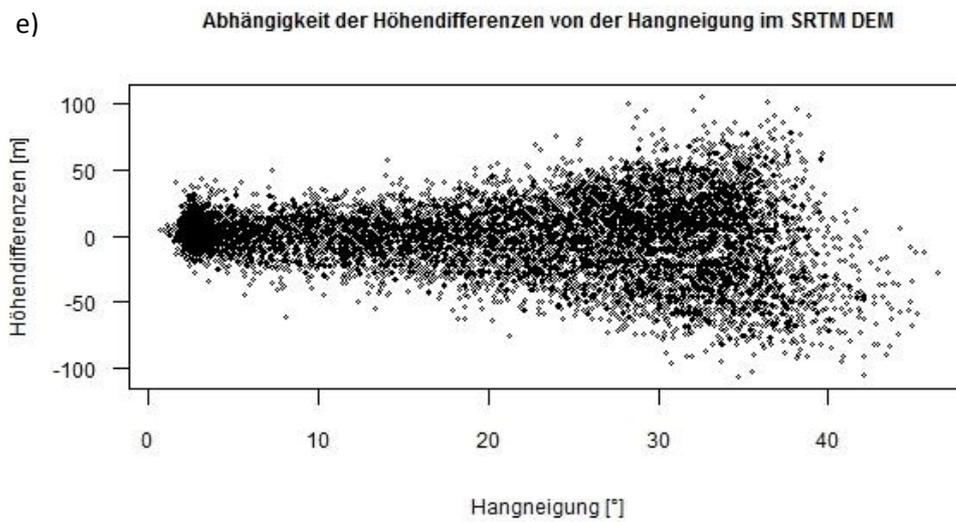
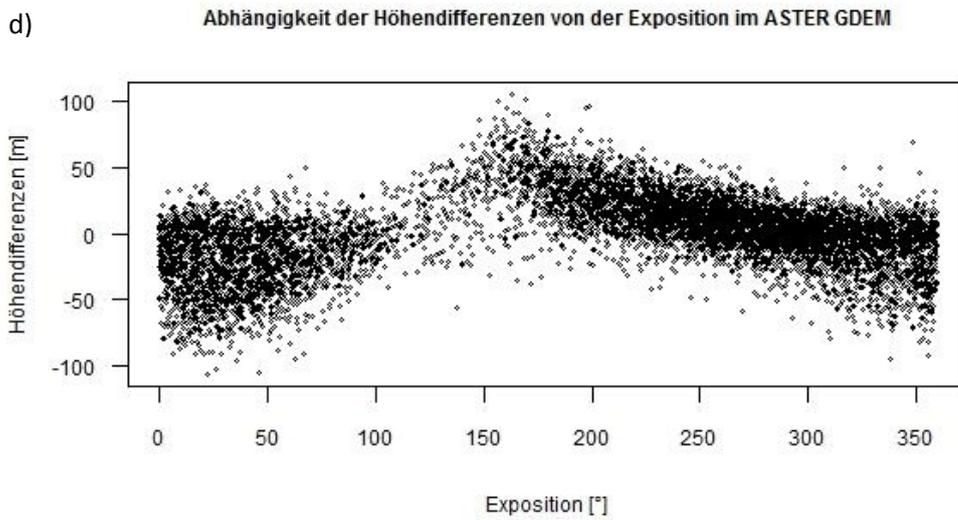


d) **Höhenfehler zwischen GDEM und SRTM DHM koregistriert**



Anhang 17: Häufigkeitsverteilung der a) Höhenwerte im ASTER GDEM b) Höhenwerte im SRTM DHM c) Höhendifferenzen zwischen ASTER GDEM und SRTM DHM d) Höhendifferenzen zwischen ASTER GDEM und SRTM DHM nach der Koregistration. (eigene Auswertung)





Anhang 18: Abhängigkeit der Höhendifferenzen von der Höhe (a und b), der Exposition (c und d) und der Hangneigung (e und f) für das ASTER GDEM und SRTM DHM. (eigene Auswertung)

## **Persönliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Katharina Zimmermann  
Zürich, 26. Februar 2015

