

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN (IUNR)

Schnee, Gletscher und Permafrost - Zustand und
Entwicklung der europäischen Hochgebirge

GIS basierte Analyse von Solifluktionsloben im Val Müstair



Semesterarbeit 2, 5. Semester

Autor: Corsin Wetter

Bachelorstudiengang 2020 Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 09. Februar 2023

Fachkorrektor

Dr. Johann Junghardt

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Campus Wädenswil

Institut Umwelt und Natürliche Ressourcen IUNR, Postfach, 8820 Wädenswil

Titelbild

Abbildung 1 Titelbild, Ansicht auf die Solifluktionsloben auf den Murters da Champatsch im Val Müstair (Wetter C., 2022)

Impressum

Schlagworte (Keywords)

Solifluktion, Solifluktionsloben, Frost, Permafrost, Bodenkriechen, Präglaziale Höhenstufe, Val Müstair, Kryosphäre

Zitiervorschlag

Wetter, C., 2023, „GIS basierte Analyse von Solifluktionsloben im Val Müstair“. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW. Wädenswil, Schweiz.

Adresse

Corsin Wetter

Chasa Curtins 24A

7535 Valchava

Zusammenfassung

Das Untersuchungsgebiet im Val Müstair bei den Murters da Champatscha weisen Bodenstrukturen auf, die durch Frosteinwirkung geprägt sind. Dabei spricht man bei diesen Formationen von Solifluktionsloben.

Diese gehen aus der Solifluktion, die als Bodenkriechen durch Einwirkung von Witterung und Wasser bekannt ist (Haas, 2013). Diese Solifluktionsloben sind typische geomorphologische Muster, die in der präglazialen Höhenstufe vorkommen. Die Solifluktionsloben bewegen sich langsam den Hang hinunter. Bei den Solifluktionsloben bei Munt Chavagl im SNP (schweizerischer Nationalpark) hat man zwischen 1995 und 2011 eine jährliche Bewegungsrate von 1 bis 8 cm gemessen (Haller et al., 2013) (Furrer, 1954).

In dieser Arbeit wurde mittels historischer Luft- und Satellitenbilder die Flächenzunahme der Solifluktionsloben bei den Murters da Champatscha gemessen. Dabei war die Qualität der Bilder sehr unterschiedlich, dass die Evaluierung der Jahresstände unpräzise gemacht hat. Zwischen dem Luftbild von 1946 und dem Satellitenbild von 2019 wurde eine Flächenzunahme von rund 22, respektive 25 % gemessen. Jedoch sind die Zahlen nicht äusserts repräsentativ, weil die Qualität der Bilder sehr stark ist (Kersten, 2002).

Schlussendlich ist eine Flächenzunahme ersichtlich, jedoch die Ermittlung mittels Luft- und Satellitenbilder ist für diese Art von geomorphologischen Mustern nicht praktikabel, um genaue Werte zu bekommen.

Abstract

The study area in Val Müstair near the Murters da Champatscha has soil structures that are characterised by frost action. These formations are referred to as solifluction lobes. These are the result of solifluction, which is known as soil creep caused by the effects of weather and water. These solifluction lobes are a typical geomorphological pattern that occurs in the preglacial highlands (Haas, 2013). The solifluction lobes move slowly down the slope. In the case of the solifluction lobes at Munt Chavagl in the SNP (Swiss National Park), an annual movement rate of 1 to 8 cm was measured between 1995 and 2011 (Haller et al., 2013).

In this study, the area increase of the solifluction lobes at the Murters da Champatscha was measured using historical aerial and satellite images. The quality of the images was very different, which made the evaluation of the annual levels imprecise. Between the aerial photograph of 1946 and the satellite image of 2019, an increase in area of around 22% and 25% respectively was measured. However, the figures are not very representative because the quality of the images is very variable (Kersten, 2002).

Finally, an increase in area is evident, but the determination by means of aerial and satellite images is not practicable for this type of geomorphological pattern in order to obtain accurate values.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	1
Kartenverzeichnis.....	1
Diagrammverzeichnis	1
Abkürzungsverzeichnis	1
1. Einleitung	2
1.1. Fragestellung	3
1.2. Beschrieb des Untersuchungsgebiets	3
1.3. Begriffserläuterung zur Kryosphäre.....	4
a Begriffserklärung zur Solifluktion	4
2. Landschaftseigenschaften.....	6
2.1. Landschaftsstrukturen durch Gletscher	6
2.2. Geologie	6
2.3. Klima	7
3. Methodik und Material zur Feldarbeit.....	8
3.1. Methodik.....	8
a Ausbreitung mittels historischer Luftbilder zwischen 1946 und 2019.....	8
b Analyse aus dem 3D-Modell	8
c Analyse des Bodenprofils	8
3.2. Material	8
3.3. Datengrundlage	9
a Datenqualität der Satellitenbilder	9
4. Ergebnisse aus den Daten	10
4.1. Untersuchungsvariante 1: Ausbreitung mittels historischer Luftbilder zwischen 1946 und 2019.....	10
4.2. Analyse aus dem 3D-Modell und Klimadaten	12
a Neigung	12
b Ausrichtung	12
c Ergebnisse aus dem Drohnenflug zum Stand der Solifluktionsloben 2022.....	13
4.3. Analyse des Bodenprofils	14
5. Diskussion.....	15
5.1. Schlussfolgerung.....	15
6. Literaturverzeichnis	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Titelbild, Ansicht auf die Solifluktsloben auf den Murters da Champatsch im Val Müstair (Wetter C., 2022).....	2
Abbildung 3 Solifluktsterrassen in Alaska (daburnas Logbuch, Sikes D., 2022).....	2
Abbildung 3 Solifluktsloben bei Murters da Champatsch, Val Müstair, Graubünden (Wetter C., 2022).....	2
Abbildung 4 Übersichtskarte mit der Position des Untersuchungsgebiet (www.map.geo.gr.ch, 2023)...	3
Abbildung 5 Grundprinzip der Gelifluktion (Leser, 1998).....	5
Abbildung 6 Typische Querwellung der Solifluktsloben (Glade R. et al., 2021).....	5
Abbildung 7 Rauhacke (mineralienatlas.de, 2022).....	6
Abbildung 8 Klimadaten von der Messstation Buffalora, Ofenpass (meteoschweiz.admin.ch, 2023)	7
Abbildung 9 Unterschiede in der Bildqualität der Luftbilder zwischen 1946 und 2022 (Luftbilder vom Kanton Graubünden, 2022, Drohnenaufnahmen von Wetter C., 2022).....	9
Abbildung 10 Zeichnung des Bodenprofils (Wetter C., 2023).....	14
Abbildung 11 Bild des Bodenprofils mit der Quer- und Längsansicht in der Solifluktsloben (Wetter C., 2023).....	14

Kartenverzeichnis

Karte 1 Versuchsflächen zur Ermittlung der Flächenausbreitung der Solifluktsloben im nördlichen Untersuchungsgebiet (Solifluktsloben Nr. 1 bis 8 und 14)	10
Karte 2 Versuchsflächen zur Ermittlung der Flächenausbreitung der Solifluktsloben im südlichen Untersuchungsgebiet (Solifluktsloben Nr. 9 bis 13).....	11
Karte 3 Karte mit den Neigungen der Hänge (Wetter C., 2022)	12
Karte 4 Karte mit der Ausrichtung der jeweiligen Hänge (Wetter C., 2022).....	12
Karte 5 Karte mit dem aktuellen Stand der Solifluktsloben (Wetter C., 2022).....	13

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Entwicklung der Flächenzunahme an den Solifluktsloben Nr. 1 bis 8 und 14	10
Diagramm 2 Entwicklung der Flächenzunahme an den Solifluktsloben Nr. 9 bis 13.....	11

Abkürzungsverzeichnis

GIS	Geoinformationssystem
DTM	Digitales Terrainmodell
WMS	Web Map Service
SoFl	Solifluktsloben

1. Einleitung

Die Präglaziale Höhenstufe ist geprägt von Gletscher, Permafrost, Frost und sehr harschen Witterungseinflüssen. Durch Gletscher wurden Landschaftsformen in allen Arten geschaffen. Ob steile Bergflanken oder Hügellandschaften, allesamt weisen Spuren von Erosion auf. Im Hochgebirge befindenden Böden haben oft Strukturformationen, die durch Permafrost oder Frost beeinflusst sind. Das Zusammenspiel zwischen den Landschaftsformen, die durch Gletscher entstanden sind und die Freilegung von Gesteinsschichten, die durch Permafrost oder Frost typische Geomorphologische Muster bilden, sind sehr vielseitig (Furrer, 1954). Wo Permafrost vorkam, und dieser zurückgegangen ist, zeigen sich Setzungen vom Boden. In Frostgeprägten Gebieten findet man heutzutage eine Form, die typisch für die präglaziale Höhenstufe ist, die Solifluktion (Haller et al., 2013).

Die Solifluktion beschreibt das Bodenkriechen, das durch Einwirkung von Witterung und Wasserzugabe entsteht (Spekturm.de, 2001). Das Ausapern im Frühling und die dicke der Schneedecke im Winter haben einen grossen Einfluss auf die Solifluktion. Desto geringer die Schneedecke im Winter ist, desto tiefer kann der Frost im Boden eindringen. Die Tiefe entscheidet somit über die Stärke der im folgenden Jahr erfolgendem Bodenkriechen. Heisst, umso tiefer die Frosttiefe, desto mehr Einfluss kann das Ausapern und das Auftauen des Frosts im Frühling auf den Boden haben. Hinzufügen ist der Wasserhaushalt im Boden, bei geringem Wasseranteil kann auf mehr Frosttiefe nicht gleichzeitig mehr Bodenkriechen heissen. Es ist also ein Zusammenspiel zwischen Frost und Wasserhaushalt, was die Solifluktion verursacht (Haas, 2013).

Es gibt zwei Arten von Solifluktion, die Loben und die Terrassenformen. Sie unterscheiden sich im Wasserhaushalt. Bei den Terrassen ist der Wasserhaushalt um ein Vielfaches grösser als bei den Loben, was sich auch an die Geschwindigkeit beim Bodenkriechen zeigt (Haas, 2013).



Abbildung 3 Solifluktionsterrassen in Alaska (daburnas Logbuch, Sikes D., 2022)



Abbildung 3 Solifluktsloben bei Murters da Champatsch, Val Müstair, Graubünden (Wetter C., 2022)

1.1. Fragestellung

Ziel der Semesterarbeit ist es herauszufinden mittels Literaturrecherche wie die Bildung der Solifluktsloben sind. Mit einer Analyse aus Satellitenbildern, Drohnenaufnahmen und dem Bodenprofil wird aufgezeigt, wie sich die Solifluktsloben in den letzten 80 Jahren entwickelt haben.

Die Semesterarbeit soll folgende Fragestellungen beantworten:

- Kann anhand von historischen Luft-/ Satellitenbilder eine Bewegung der Solifluktsloben ermittelt werden?
- Was können die treibenden Kräfte bei der Bildung der Solifluktsloben in dem Untersuchungsgebiet sein?
- Wie bewegen sich die Solifluktsloben in dem Untersuchungsgebiet?

1.2. Beschrieb des Untersuchungsgebiets

Das Gebiet befindet sich im Val Müstair. Das Val Müstair ist das östlichste Tal der Schweiz und liegt im Kanton Graubünden. Angrenzend zum Val Müstair ist der schweizerische Nationalpark, sowie das Unterengadin. Das Val Müstair oder in deutscher Sprache das Münstertal hat eine Fläche von 198.6 km², mit dem tiefsten Punkt bei rund 1'220 m.ü.M. und der höchste Punkt ist der Piz Murtaröl mit 3'180 m.ü.M. (Cumün da Val Müstair, 2022).

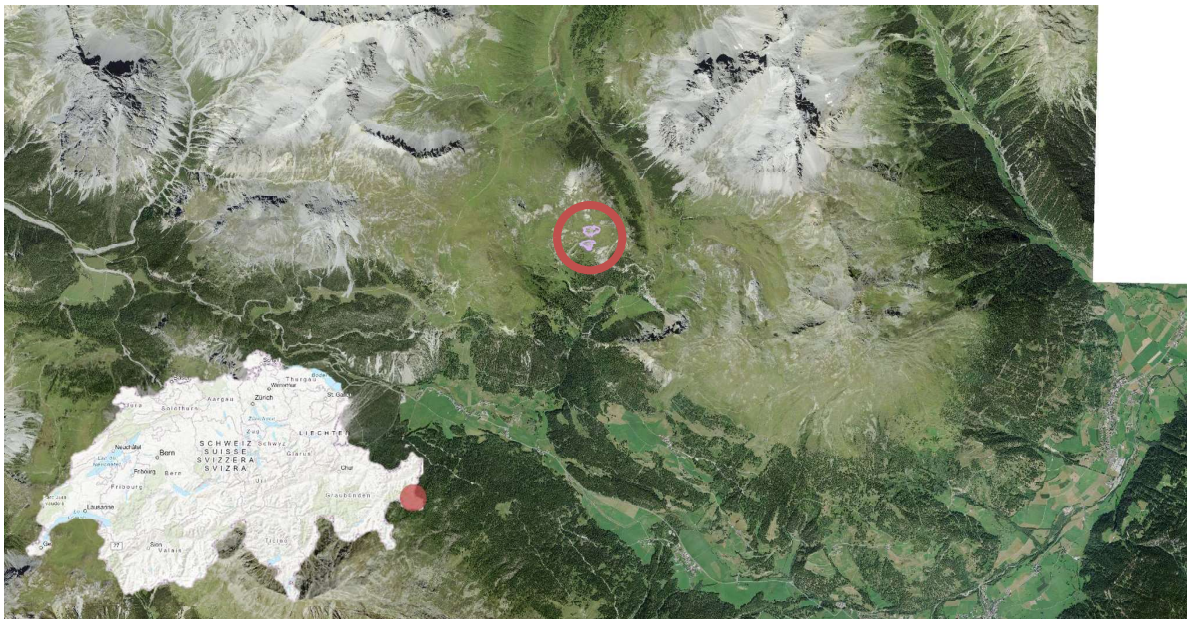


Abbildung 4 Übersichtskarte mit der Position des Untersuchungsgebiet (www.map.geo.gr.ch, 2023)

Das Untersuchungsgebiet liegt auf der Fläche der Fraktion Valchava, bei der Alp da Champatsch. Der Ortsname des Untersuchungsgebiets ist Murters da Champatsch, das auf einer Höhe zwischen 2'200 bis 2'491 m.ü.M. liegt. Das Gebiet umfasst rund 1.40 km². Die Murters da Champatsch ist eine Hügellandschaft ohne wirkliche Bergspitzen. Sie sind geformt durch Gletschererosion und beinhalten Gebirgs-Trockenwiesen und schroffe Felsstrukturen (Leser, 1998).

1.3. Begriffserläuterung zur Kryosphäre

Der Überbegriff ist die Kryosphäre, was das Vorkommen von festem Wasser auf einem Himmelskörper definiert, und ist ein Teil der Hydrosphäre (Schönwiese, 2020). In der Kryosphäre sind sämtliche Einflüsse durch festes Wasser einbegriffen.

Gletscher mit Erosion der Landschaft und Gebirge, Forstsprennung von Steinen, die zur Bildung von Sand, Tonen und Lehmen führt. Die übergeordneten Verwitterungsprozesse bilden die Grundlage für die Entstehung von Böden, Bodenbewegungen und Erosionsarten (Hagg, 2021).

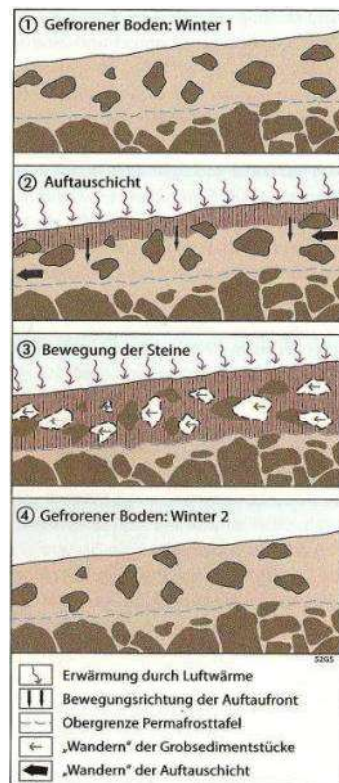
Durch die Frosteinwirkung auf Boden und Gestein kann erst die Solifluktion erfolgen. Somit ist Frost einer der treibenden Kräfte für die Solifluktion (Margesin, 2008). Dazukommt der Einfluss vom Ausapern (von Schnee) im Frühling, der eine beträchtliche Wassermasse im Boden einträgt, das wiederum das Bodenkriechen begünstigt (Gerber, 2012).

a Begriffserklärung zur Solifluktion

Die Solifluktion ist ein geologischer Prozess, bei dem das Material in einem Gebiet durch den Einfluss von Witterung und Wasser in Bewegung gebracht wird (Spekturm.de, 2001). Solifluktion kommt vor allem in Gebieten mit starken Temperaturschwankungen und hoher Niederschlagsmenge vor, wie zum Beispiel in den Polarregionen oder in Hochgebirgsregionen. Bei der Solifluktion wird das Material an der Oberfläche durch Erosion und Transport abgetragen und tiefer in das Bodenprofil gedrückt (Carbiener, 1966). Dort wird es dann durch den Druck und die Kälte zu einer Art Schlamm-Eisgemisch verfestigt. Mit der Zeit kann sich dieses Gemisch wieder auflösen und das Material wird erneut an die Oberfläche transportiert (Weise, 1983).

Die Art, Form und Fliessgeschwindigkeit von Solifluktsloben sind durch verschiedene Einflüsse differenzierbar. Hauptarten der Fliessart sind Frostkriechen, das sogenannte Regelationsfliessen und das Durchtränkungsfliessen (Gelifluktion). Bei dem Regelationsfliessen wird das Kriechen der Masse aufgrund von Frostwechsel (Herbst zu Frühling) definiert. Dabei friert das Wasser im Boden im Herbst (Oktober – November) und dehnt die Masse durch die Volumenzunahme aus. Infolgedessen können auch Eislinsen entstehen, die den Boden anheben (Frosthub). Beim Auftauen sackt der Boden ein. Durch das Einsacken bewegt sich die Bodenmasse in Folge der Schwerkraft und der Hangneigung, Hang abwärts (Jaesche, 1999).

Darunter kann noch von Loben oder Terrassen unterschiedet werden. Die Solifluktionsterrassen entstehen durch gleichmässigen Bodenkriechen im ganzen Hang und sind meist durchnässter als Solifluktsloben (Spekturm.de, 2001).



Die Gelifluktion beschreibt das langsame Fließen von Wasser im durchtränkten Boden im Frühsommer. Im Untergrund dieser Schicht befindet sich meist der gefrorene Untergrund und bildet somit eine Gleitfläche (Lindenthaler, 2011). Der Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts im Boden sorgt für eine Zunahme des Porenwasserdrucks, was zur Reduktion der Kohäsion im Boden führt. Dieser Prozess sorgt dann das die Masse hangabwärts bewegt. Für die Gelifluktion müssen die Voraussetzung wie ein grosser Anteil an feinkörniges Material wie Feinsand, Schluff und Ton gegeben sein (Ahnert, 2015). In grossporigen Substraten findet dieser Prozess nicht statt.

Abbildung 5 Grundprinzip der Gelifluktion (Leser, 1998)

1. In der ersten Abbildung ist der Ausgangszustand zu sehen. 2. Wird durch Auftauen von Schnee und Aufnahme von Regenwasser, Wasser im Boden gespeichert. 3. Das durchfeuchte Material bewegt sich durch Einwirkung der Schwerkraft hangabwärts.

Die Formenarten der Solifluktsloben sind durch die Neigung des Hangs, Ausrichtung des Hangs, Klima (Temperatur, Sonnenstunden, Niederschlagsmengen), Höhenlage und des Ausgangsmaterials unterschiedlich (Haller et al., 2013).

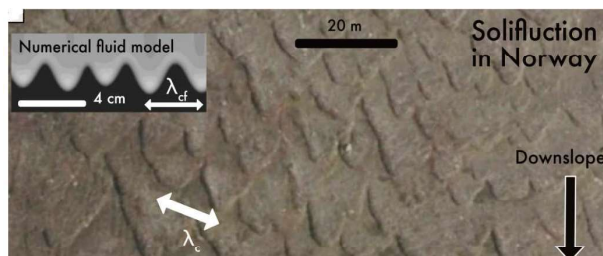


Abbildung 6 Typische Querwellung der Solifluktsloben (Glade R. et al., 2021)

Typisch für Solifluktsloben ist das Auftreten der Querwellung am unteren Rand der Loben. Diese ist zurückzuführen auf verschiedene Einflüsse wie unterschiedliche Fließgeschwindigkeit, Stärke der Bepflanzung oder Hindernisse wie grössere Steine oder Bäume. Die Länge und Breite der Wellen sind abhängig von Hangneigung. Desto steiler die Neigung, desto länglicher sind die Loben (Ridefelt et al., 2008).

2. Landschaftseigenschaften

2.1. Landschaftsstrukturen durch Gletscher

Die letzten Gletscher, die im Untersuchungsgebiet die Landschaft geformt haben, stammen aus dem Quartär Eiszeitalter, das vor rund 2.588 Millionen Jahren stattgefunden hat (Hantke, 2011). Die Kuppen-Bildung der Murters da Champatsch stammen aus dieser Zeit. Daraufhin wurde durch Erosion steilere Hänge ausplanert. Heute sind die Kuppen gut ersichtlich. Durch den Druck der Gletscher entstanden die karrieristischen Eindellungen und Kuppeln im Gebiet. Daher kommt aus der Rätoromanische Name «Murters», was so gutheisst wie kleine Hügel.

2.2. Geologie

Das Gebiet rund um den Ofenpass liegt auf dem Oberostalpin. Die Hauptgesteinsart ist der Dolomit, genauer gesagt, hauptsächlich der Arlbergdolomit. Vereinzelt kommt auch Dolomit mit bunten Tonschiefern oder mit Diploporen vor. Vereinzelt ist auch der Hauptdolomit vertreten. Die Zusammensetzung der verschiedenen Dolomitarten variiert stets (Haller et al., 2013). Ein grösserer Teil der Fläche ist zudem von Moränenmaterial besetzt. Hinzukommt, dass der grösste Teil des Untergrundes Hangschutt, Gehängeschutt und Trockenschuttkegel ausmacht. Diese Unterschiede in den Gesteinsarten, fluvialen oder glazialen Ablagerungen haben für die Bildung von Solifluktsloben eine primäre Rolle. Im sauren Boden aus genannten Ausgangssubstraten sorgen vor allem Pilze und Bakterien für den Abbau organischer Substanzen, grössere Bodenwühler wie Regenwürmer sind eher selten. Diese Böden gelten als nicht weit entwickelte Böden und sind mehrheitlich saure Böden (Lütscher et al., 2016).

Das Hauptgestein, das im Untersuchungsgebiet, sowohl in den Solifluktsloben als auch im «Ausbruchgebiet» zu finden ist, ist die Rauhwacke. Dieses Gestein ist ein poröser und gelblicher Dolomit, das sich auszeichnet durch seine unregelmässigen Hohlräume (Meyer, 2022). Die Hohlräume sind durch Auswaschung des wasserlöslichen Gipses entstanden.



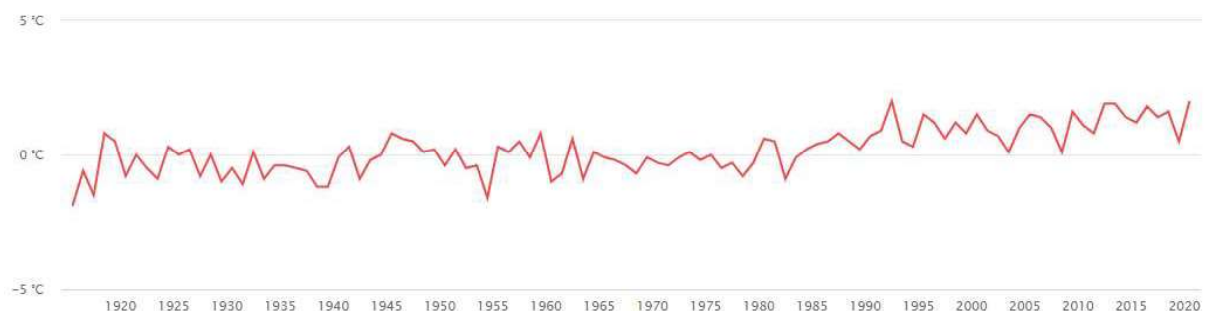
Abbildung 7 Rauhwacke (mineralienatlas.de, 2022)

2.3. Klima

Das Klima bei den Murters da Champatsch wird von der inneralpinen Trockenheit geprägt. Die Lage und Distanz zu den Flachebenen bilden eine natürliche Barriere gegen eine hohe Niederschlagsaktivität. Dazu kommt, dass die Region um den Ofenpass zu den kältesten Orten in der Schweiz gehört. Die Gesamt-Niederschlagsmenge im Jahr liegt in der Südschweiz sowie Voralpen bei rund 2000 mm, wobei es in Val Müstair nur rund 800 mm Niederschlag ist (Ketterer & Haller, 2009). Dementsprechend ist die Region auch eine der sonnigsten in den Alpen, die Anzahl der Sonnentage liegen bei rund 300 Tage im Jahr. Die meisten Niederschläge sind in den Monaten Juli und August zu verzeichnen. Die maximalen Temperaturen erreichen rund 28 °C im Juli, die tiefste Temperatur bis -36,2 °C im Januar. Es ist anzumerken, dass wegen der Klimaerwärmung die Temperaturen in Zukunft steigen werden, während die Niederschläge (Regen und Schnee) und der Permafrost abnehmen (Ketterer & Haller, 2009).

Beim Untersuchungsgebiet ist noch anzumerken, dass dieser auf einer Bergkuppe befindet, und somit auch nicht durchstehendes Wasser oder Hochmoore weiter vernässt wird. Durch das Grundgestein Dolomit und die daraus entwickelte Rauhwacke ist das Gestein sehr porös und kann wenig Wasser speichern. Daher ist auch die Verdunstung von Wasser im Untersuchungsgebiet klein.

Temperatur, Jahresmittel



Niederschlag, Jahressumme

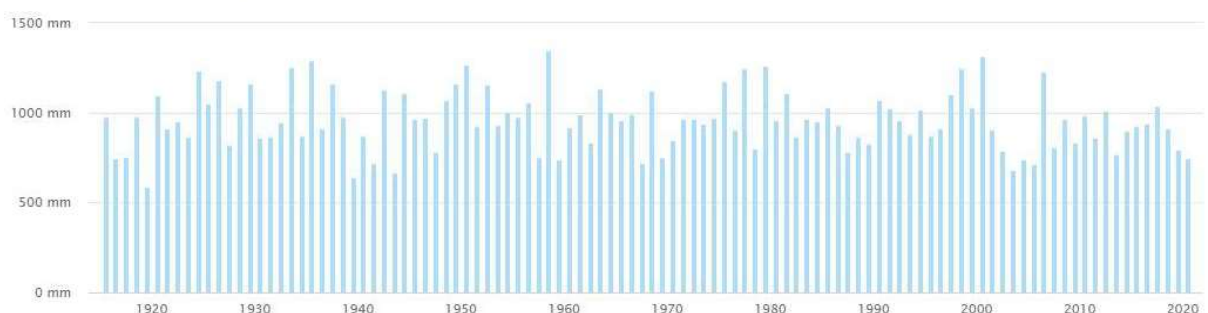


Abbildung 8 Klimadaten von der Messstation Buffalora, Ofenpass (meteoschweiz.admin.ch, 2023)

3. Methodik und Material zur Feldarbeit

Für die Untersuchung der Ausbreitung und der Eigenschaften der Solifluktionsloben werden drei Arten von Methoden angewendet. Die erste ist die Entwicklung der Lobe mittels historischer Luftbilder, die zweite ist die Analyse aus der 3D-Datei mittels Hangneigung, Ausrichtung in den Himmelsrichtungen und der Vegetation und weiteren Merkmalen wie Steine und Klima. Die vierte Untersuchungsebene bildet die Felduntersuchung, wo anhand von einem Bodenprofil die Bewegung der Lobe analysiert wird. Zu der ersten und zweiten Untersuchungsvarianten werden dann zusätzlich Klimavorhersagen beigefügt, um zu ermitteln, wie sich das Loben in Zukunft verhalten können.

3.1. Methodik

a Ausbreitung mittels historischer Luftbilder zwischen 1946 und 2019

Die Satellitenbilder wurden durch das WMS des Kantons Graubündens bezogen (WMS Kanton Graubünden, 2022). Die Satellitenbilder haben bei der ersten Begutachtung eine grössere Abweichung zum Heutigen stand. Dabei wurden die Satellitenbilder neu georeferenziert nach den Aufnahmen der Drohne. Zudem war auch eine Ungenauigkeit in den verschiedenen Jahresständen (1946 bis 2019) zu vermerken. Für die Georeferenzierung wurden Punkte ausgewählt, die sich in den letzten 73 Jahren nicht verändert haben, wie Steine oder Geländekanten.

Die Jahresverläufe wurden dann als Polygone nachgezeichnet. Dabei wurde nicht die kompletten Loben nachgezeichnet, sondern ein definierter Bereich. Dabei war es wichtig, den oberen Abschluss klar zu definieren. Es wurde Wert gelegt, dass die Spitze der Lobe analysiert wird, da dort am besten den Verlauf der Lobe erkennbar war.

b Analyse aus dem 3D-Modell

Für die 3D-Modellierung (DTM) wurde mittels einer Drohne ein vordefiniertes Gebiet abgeflogen. Die Drohne hat auf einer definierten Höhe Bilder gemacht, die dann in Programm Pix4Dmapper in 3D-Strukturen umgewandelt wurden. Im Programm ArcGIS konnten dann mithilfe dieser Struktur die Neigung und Ausrichtung der Hänge ermittelt werden.

Die hohe Auflösung der Bilder ermögliche es, Vegetationsstruktur zu analysieren.

c Analyse des Bodenprofils

Es wurden Strukturen und Schichten analysiert. Dabei war die Aufnahme von pH-Werten und genaue Gesteinszusammensetzungen unwichtig. Das Bodenprofil sollte einen Einblick in den Loben geben. Mittels des Bodenprofils soll das Bodenkriegen sichtbar gemacht werden.

3.2. Material

Die Daten zu den ersten zwei Untersuchungsvarianten werden im Kapitel 5 näher beschrieben. Diese stammen allesamt von Kantonalen Daten aus Graubünden oder der Daten vom Bundesamt für Topografie.

Für die Evaluierung der Neigung und Ausrichtung der Solifluktionsloben wurde mittels einer Drohne (DJI-Phantom 4) mithilfe vom Programm Pix4Dmapper eine Route definiert, die dann die Drohne

abgeflogen ist und 256 Bilder gemacht hat (genauere Daten zur Aufnahme sind im Anhang 2 zu finden). Die Drohne wurde vom Startpunkt auf eine fixierte Höhe geflogen und ist dann auf dieser Höhe konstant geflogen, um die Aufnahmen zu machen. Mittels der Bilder und der referenzierten Höhe konnte dann mithilfe des Programms ein 3D Modell erstellt werden. Das 3D Modell weist eine Genauigkeit von $\pm 3.71\text{cm}$.

Für das Bodenprofil wurde ein geeignete Lobe im Untersuchungsgebiet definiert. Diese weist eine gut sichtbare Formbildung auf. Zudem war bei diesen Loben der Überwälzung vom Erdreich gut sichtbar. Für das Bodenprofil wurde ein Ausschnitt auf der Seite bestimmt. Dieser weist eine Abmessung von rund 1.0 auf 1.0 auf 1.0 m (H x B x L) auf. Das Bodenprofil wurde mit einer Spitzhacke und einer Schaufel ausgehoben. Das Aushubmaterial wurde zwischen Humusschicht und C-Profilmaterial getrennt gelagert und nach Abschluss der Untersuchung wieder vollständig so wie im Ursprung wieder verschlossen. Für die Bemessung der Schichten wurde ein Doppelmeter gebraucht. Für die Ermittlung der Ausmasse der Lobe wurde ein Messband (25 m) gebraucht. Die Koordinaten wurden anhand einer App (Swisstopo-App) ermittelt.

3.3. Datengrundlage

a Datenqualität der Satellitenbilder

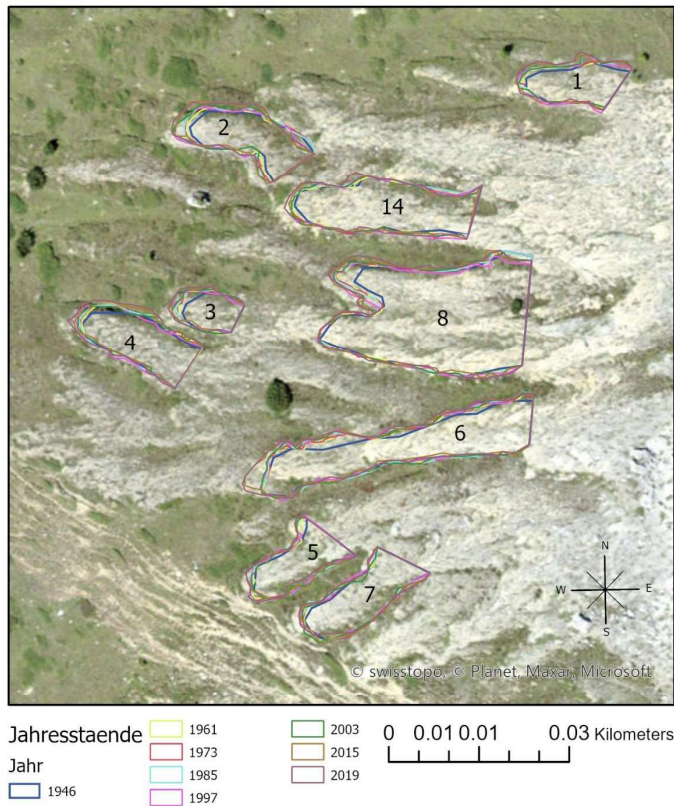
Die Datengrundlage für die Ermittlung der Ausbreitung mittels historischen Luftbildern ist darauf angewiesen, dass die Daten die gleiche Qualität aufweisen. Jedoch weisen die Daten zwischen 1946 und 2019 deutliche Unterschiede auf. Dies ist gut ersichtlich in der Abbildung 2. Es ist gut erkennbar, dass die Pixel im Bild ganz links sehr gross sind, wobei beim Jahr 2019 die Qualität um ein Vielfaches besser ist. Was jedoch gesagt werden muss, ist dass nicht jedes Luftbild die gleichen Interpretationsmöglichkeiten geben. So ist zwischen dem Luftbild von 2019 und den Drohnenaufnahmen von 2022 auch Unterschiede erkennbar. Je nach Sonnenstand kann so die Tiefe der Landschaftsstruktur unterschiedlich sein, was wiederum eine andere Interpretation ermöglicht. Diese andere Interpretation erschwert wiederum, die genauen Anhaltspunkte in der Landschaft zu finden (Baltsavias et al., 1998). Die Bildauflösung ist zwischen 2019 und 1946 ist 13-mal höher (Kersten, 2002).



Abbildung 9 Unterschiede in der Bildqualität der Luftbilder zwischen 1946 und 2022 (Luftbilder vom Kanton Graubünden, 2022, Drohnenaufnahmen von Wetter C., 2022)

4. Ergebnisse aus den Daten

4.1. Untersuchungsvariante 1: Ausbreitung mittels historischer Luftbilder zwischen 1946 und 2019

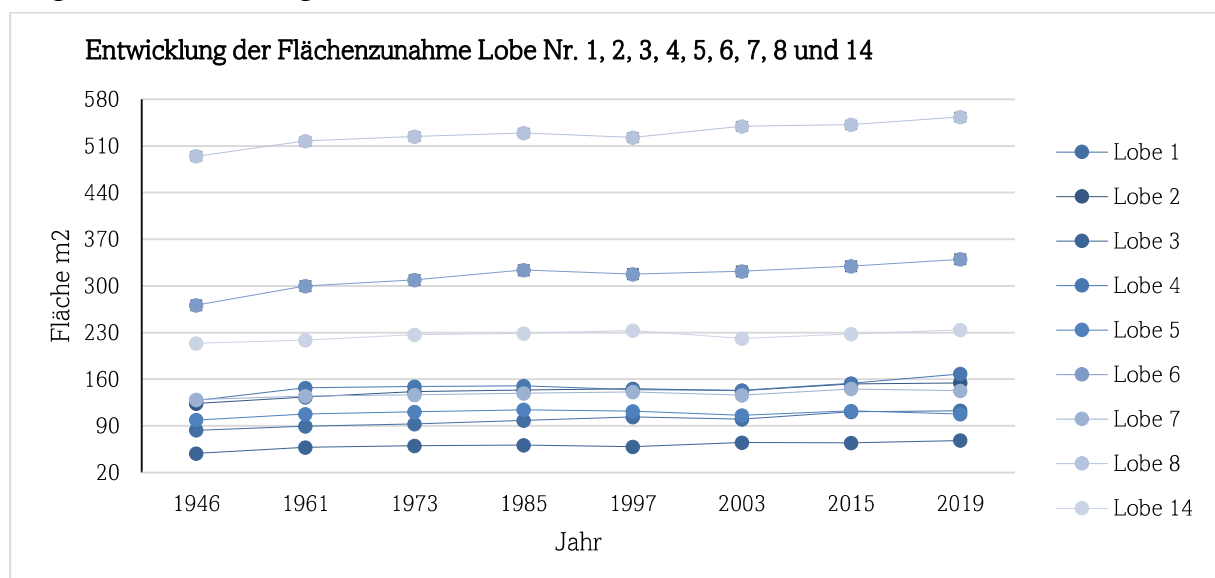


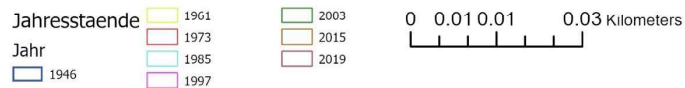
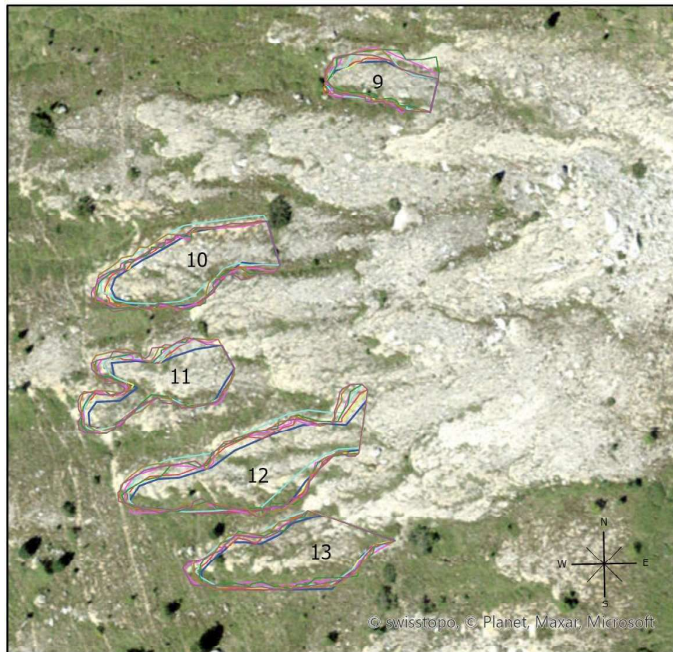
Durch Analyse der Flächen hat sich ein Flächenzuschlag im Mittel von rund 22 % von 1946 und 2019. Dabei ist jedoch nicht ein Faktor für Ungenauigkeit beigefügt. Anhand der unterschiedlichen Qualität der Satellitenbilder ist eine gewisse Ungenauigkeit der Bestimmung der Aussenlinie nicht vermeidbar. Jedoch ist im Grossen ganzen deutlich zu erkennen, dass sich die Solifluktsloben weiterverbreitet haben.

Die Flächenzunahme ist abhängig von der Neigung des Hanges. Desto steiler, umso grösser wird die Solifluktsloben mit der Zeit. Die Loben Nr. 8 und 6 sind im steileren Teil des Hanges und weisen grössere Flächenzunahmen wie z.B. die Lobe Nr. 1.

Karte 1 Versuchsflächen zur Ermittlung der Flächenausbreitung der Solifluktsloben im nördlichen Untersuchungsgebiet (Solifluktsloben Nr. 1 bis 8 und 14)

Diagramm 1 Entwicklung der Flächenzunahme an den Solifluktsloben Nr. 1 bis 8 und 14





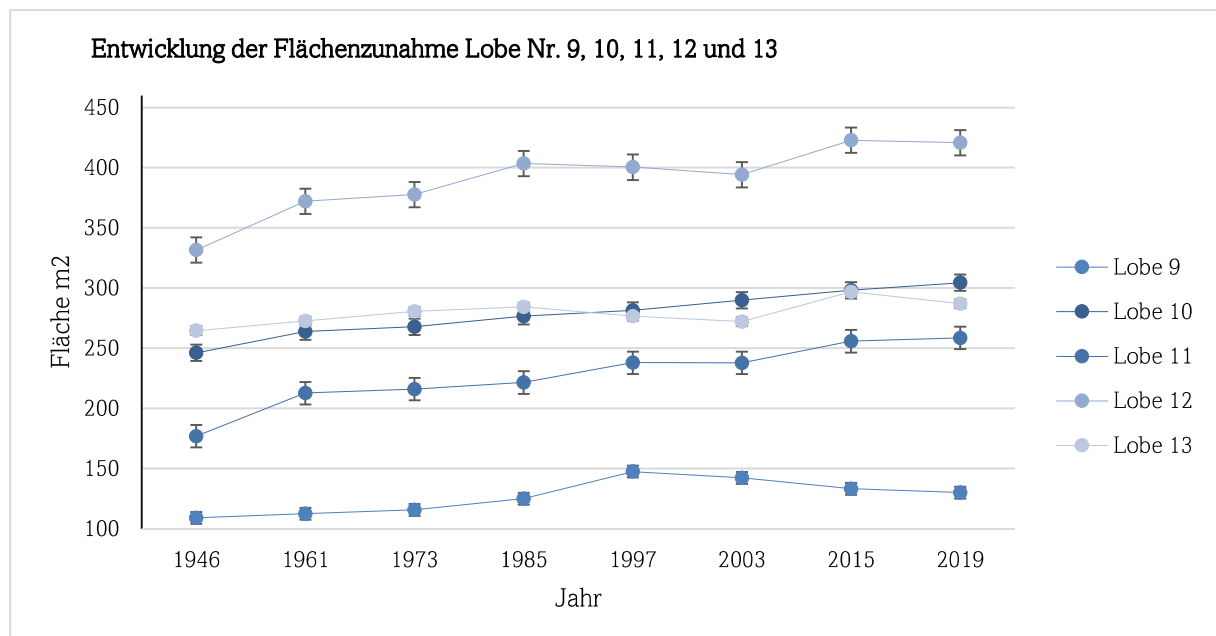
Bei dem südlichen Untersuchungsgebiet ist die Flächenzunahme der Solifluktsloben höher. Dies ist einerseits durch die höhere Hangneigung zu erklären.

Die Flächenzunahme ist hier im Mittel bei rund 25 % im Jahr 2019 zu dem Jahr 1946.

Bei dem Diagramm 2 sind Ausreisser zu sehen. Diese sind anhand der schlechten Qualität der Satellitenbilder zurückzuführen und haben für die Trendlinie keine grosse Bedeutung. Da sich der Trend der Zunahme der Fläche klar linear zunimmt.

Karte 2 Versuchsflächen zur Ermittlung der Flächenausbreitung der Solifluktsloben im südlichen Untersuchungsgebiet (Solifluktsloben Nr. 9 bis 13)

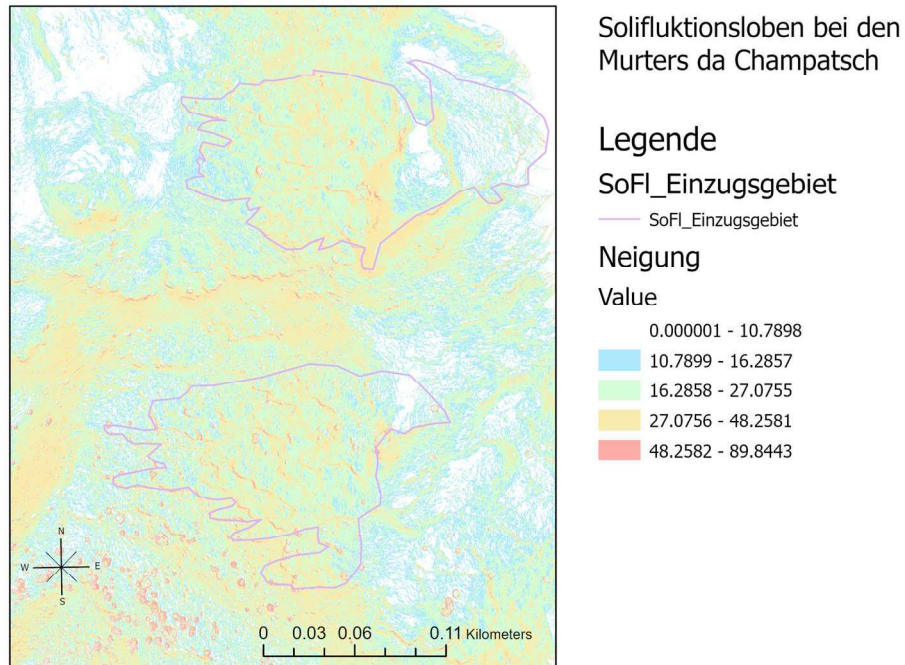
Diagramm 2 Entwicklung der Flächenzunahme an den Solifluktsloben Nr. 9 bis 13



4.2. Analyse aus dem 3D-Modell und Klimadaten

a Neigung

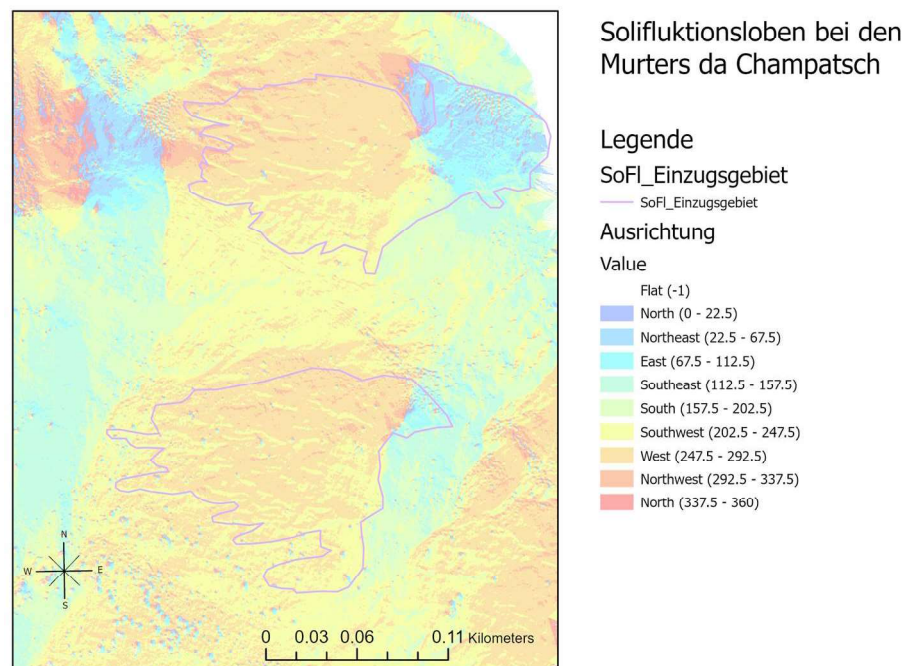
Im Untersuchungsgebiet ist die Mehrheit der Hangneigung bei rund 16 – 27 Grad. Im «Ausbruchs-ort» ist die Hangneigung höher als 27 Grad.



Karte 3 Karte mit den Neigungen der Hänge (Wetter C., 2022)

b Ausrichtung

Die langgezogenen Solifluktsloben sind allesamt nach Westen ausgerichtet.



Karte 4 Karte mit der Ausrichtung der jeweiligen Hänge (Wetter C., 2022)

c Ergebnisse aus dem Drohnenflug zum Stand der Solifluktsloben 2022

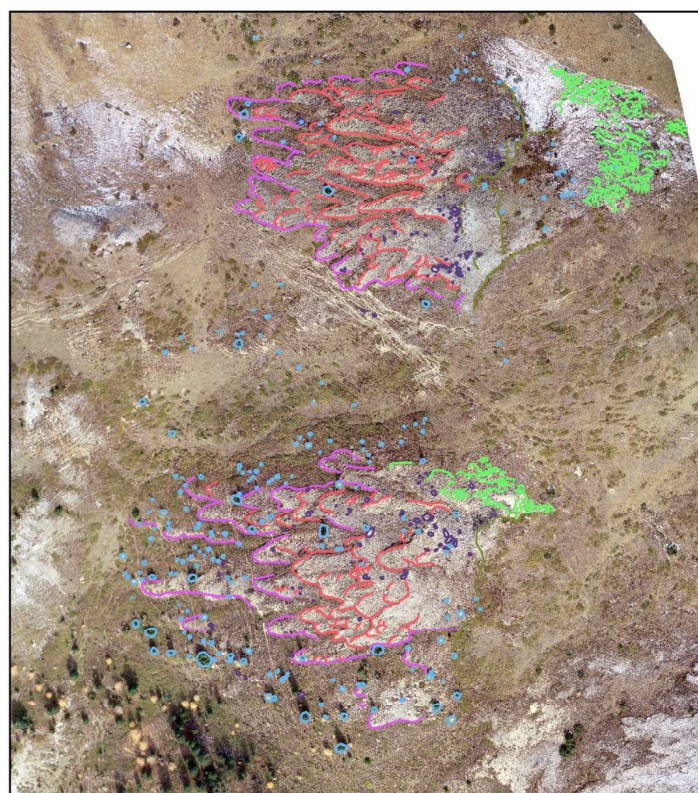
Entwicklung und Struktur der Solifluktsloben:

Es sind zwei unterschiedliche Arten von Solifluktsloben im Gebiet erkennbar. Die «kleinen» in grüner Farbe dargestellten Solifluktsloben bilden schuppenartiges Gebilde. Die eine immerwährende gleiche Grösse und Distanz zueinander aufweisen.

Im westlichen Teil sind die länglicheren Solifluktsloben, die auch dadurch entstanden sind, weil die Hangneigung zu den Schuppenartigen viel höher ist. Mit violett eingefärbte Solifluktsloben weisen keine Bewegung mehr auf. Diese nicht mehr «aktiv» und werden immer mehr von der Vegetation überwachsen. Die in rot eingefärbten Solifluktsloben haben auch im Feld Anzeichen gehabt, dass diese sich bewegen. Dabei war erkennbar, dass am Ende oder seitlich der Lobe teilweise Erdpflaster abbrechen oder überwältzt werden.

Vegetationsanalyse:

Im Untersuchungsgebiet sind viele Pionierpflanzen wie Arve *Pinus cembra* und die europäische Lärche *Larix decidue* zu finden. In der Auswertung der Drohnenaufnahme wurde ersichtlich, dass die Baumarten tendenziell das Gebiet auf dem Solifluktsloben meiden. Nur vereinzelt werden diese Baumarten in Mulden im Gebiet gefunden. Dabei ist auch sichtbar, dass die Loben in diesen Mulden sich nicht bewegen. Es kann darauf geschlossen werden, dass die Baumarten durch das fortschreitende Bodenkriechen sich nicht auf den Solifluktsloben etablieren können.



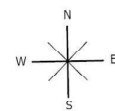
Solifluktsloben bei den Murters da Champatsch

Legende

Stand_2022

Feature

- Ausbruchkante
- Aussen_SoFl
- Baum
- Innen_Schichtung
- Kleine_SoFl
- Stein



0 0.03 0.06 0.11 Kilometers

Karte 5 Karte mit dem aktuellen Stand der Solifluktsloben (Wetter C., 2022)

4.3. Analyse des Bodenprofils

Das Bodenprofil zeigt die Entwicklung der Solifluktsloben auf. Wie in der Literatur ist das Bodenkriechen im Profil gut sichtbar. Die oberste Schicht Ah-Horizont wurde mehrmals «umgedreht». Dies ist deutlich im Querschnitt zu sehen. Die in der Abbildung 8 dunkelbraun eingefärbten Flächen an der Oberfläche wurden beim Kriechen des Bodens seitlich am Rand der Solifluktslobe geschoben, durch die steile Kante ist die oberste Schicht abgebrochen, dann von weiterem Material überlagert worden. Die untere dunkle Schicht könnte auf den Ursprünglichen alpinen Rasen, vor der Bildung der Solifluktsloben hindeuten oder auf einen Zwischenstand, wo kein Bodenkriechen stattgefunden hat und die Vegetation Zeit gehabt hat, eine dickere Humusschicht zu bilden. Daraus ist zu interpretieren, dass die untersuchte Solifluktslobe eine Mächtigkeit von rund 70-80 cm beim Bodenprofil aufweist.

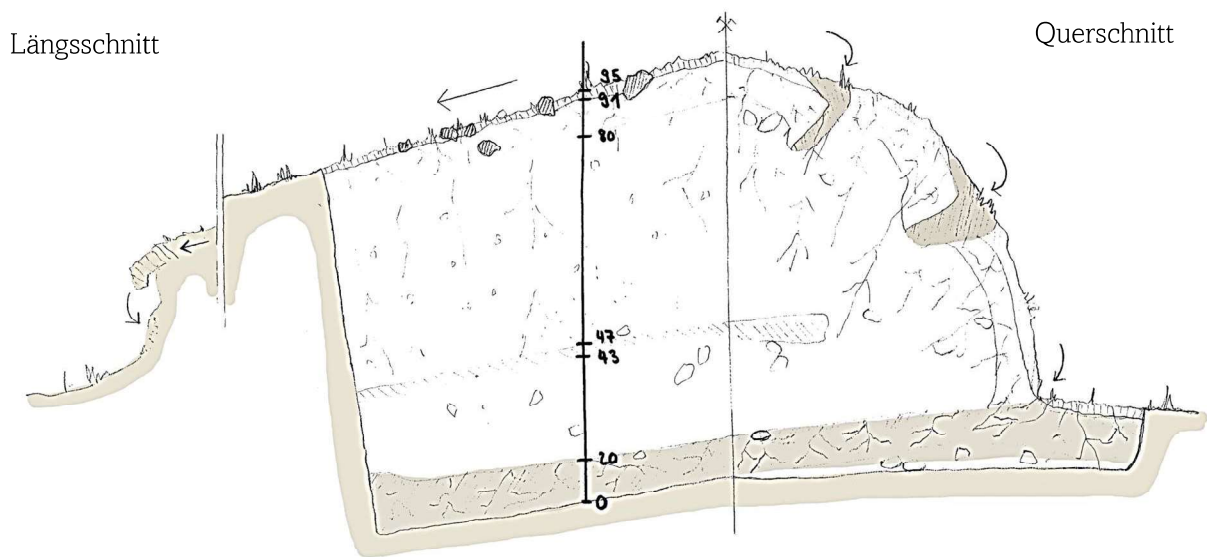


Abbildung 10 Zeichnung des Bodenprofils (Wetter C., 2023)



Abbildung 11 Bild des Bodenprofils mit der Quer- und Längsansicht in der Solifluktslobe (Wetter C., 2023)

5. Diskussion

Untersucht wurde hauptsächlich, wie stark sich die Solifluktionsloben in den letzten 73 Jahren entwickelt haben. Dabei wurde eine Flächenzunahme von rund 22 %, respektive 25 %, anhand der Luft- und Satellitenbilder zwischen 1946 und 2019 mit GIS ermittelt. Dabei ist jedoch die Genauigkeit der Luft- und Satellitenbilder zusätzlich zu berücksichtigen, die in der Pixeldichte deutliche Unterschiede haben (Kersten, 2002). Somit sind die Prozentanteile der Flächenzunahme kritisch anzusehen. Wenn man die Bilder vergleicht, sieht man bei einigen Solifluktionsloben klare Anzeichen einer Veränderung, jedoch kann abschliessend kein genauer Wert der Zunahme abgegeben werden.

Markante Landschaftsformen wie z.B. Gletscher kann man anhand von historischen Bildern besser untersuchen. Bei der Solifluktion ist auch die Vegetation je nach Jahr und Jahreszeit so unterschiedlich, dass der Vergleich von Bildern sehr schwierig ist. Diese Unterschiede der Vegetation macht eine fundierte Analyse der Jahresstände fast schon unmöglich.

5.1. Schlussfolgerung

Eine Aussicht, wie sich die Solifluktionsloben in Zukunft entwickeln werden ist nicht möglich. Für die Bildung und Weiterentwicklung des Bodenkriechens sind verschiedene Faktoren massgebend, die nicht simuliert werden können (Fickert, 1998). Nur mittels Klimaerwärmung eine Aussage zu treffen, wäre zu ungenau. Der Wasserhaushalt, Vegetationseinflüsse und die Entwicklung der Schneeereignisse sind weitestgehend noch nicht genauer für eine Aussicht ermittelt oder können gar nicht evaluiert werden (Margesin, 2008).

Ein zusätzlicher Hinweis bildet der Hang in dem die Solifluktionsloben sich befinden. Die Solifluktionsloben können nur soweit sich weiter fortbewegen, wie der Hang hoch ist. Heisst irgendwann, wenn das Bodenkriechen kontinuierlich weiter geht, haben die Solifluktionsloben eine räumliche Begrenzung.

Dass sich die Solifluktionsloben sich bewegen ist unumstritten, ob das Bodenkriechen in Zukunft mehr wird oder weniger kann abschliessend aus dieser Untersuchung nicht gesagt werden.

6. Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2015). *Einführung in die Geomorphologie* (5. Auflage). UTB.
- Baltsavias, E. P., Haering, S., Kersten, T., & Dam, A. (1998). *Geometric and radiometric evaluation of the DSW300 roll film scanner* (S. 217–234). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00007-0)
- Carbiener, R. (1966). *Frostmusterböden, Solifluktion, Pflanzengesellschafts-Mosaik und -Struktur, Erläutert am Beispiel der Hochvogesen* (S. 187–217).
- Fickert, T. (1998). *Vergleichende Beobachtungen zu Soliflukts- und Frostmustererscheinungen im Westteil Hochasiens. Formen, Ausbildung, Höhengrenzen* (Bd. 45). Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft.
- Furrer, G. (1954). *Solifluktsformen im schweizerischen Nationalpark—Untersuchung und Interpretation auf morphologischer Grundlage mit 52 photographischen Abbildungen und 9 Textfiguren*. Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.
- Gerber, C. (2012). *Erstellung einer Ausaperungskarte für das Gebiet der Solifluktsloben am Munt Chavagl*. Geographisches Insitut der Universität Bern.
- Haas, K. (2013). *Periglaziale Prozesse—Solifluktion & Blockgletscherkriechen, Seminararbeit aus Prozessgeomorphologie, SoSe 2013*. Universität Salzburg.
- Hagg, W. (2021). *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*. Springer.
- Haller, H., Eisenhut, A., & Haller, R. (2013). *Atlas des schweizerischen Nationalparks. Die Ersten 100 Jahre: Bd. 99/I. Haupt*.
- Hantke, R. (2011). *Eiszeitalter, Kalt-/Warmzeit-Zyklen und Eistransport im alpinen und voralpinen Raum*. Ott Verlag.
- Jaesche, P. (1999). *Bodenfrost und Solifluktsdynamik in einem alpinen Periglazialgebiet Hohe Tauern*. Naturwissenschaftliche Gesellschaft Bayreuth.
- Kersten, T. (2002). *Von Pixeln zu Geodaten—Potential der Photogrammetrie und Fernerkundung bei der Datenerfassung*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
<http://www.haw-hamburg.de/geomatik/>

- Ketterer, C., & Haller, R. (2009). *200 Jahre Wetter, Witterung und Klima im Gebiet des Schweizer Nationalparks auf der Grundlage von Messungen und regionalen Klimasimulationen*. Schweizerischer Nationalpark.
- Leser, H. (1998). *Geomorphologie: 8. Völlig neu bearbeitete Auflage 2003 (Das Geographische Seminar)*. Westermann.
- Lindenthaler, R. (2011). *Anwendung eines terrestrischen Laserscanners zur Erfassung solifluidaler Hangbewegungen*. Universität Salzburg.
- Lütscher, P., Frehner, M., Carraro, G., & Rutishauser, U. (2016). *Zuordnung und Darstellung der Bodenprofile der WSL-Bodendatenbank für die NaiS-Standortseinheiten* (S. 43). Bundesamtes für Umwelt BAFU Abteilung Wald.
- Margesin, R. (2008). *Soil Biology—Permafrost Soils* (Band 16). Springer.
- Meyer, J. (2022). *Gesteine der Schweiz, 2. Auflage*. Haupt Verlag.
- Ridefelt, H., Boelhouwers, J., & Eiken, T. (2008). *Measurement of solifluction rates using multi-temporal aerial photography*. ESPL - EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS.
- Schönwiese, C.-D. (2020). *Klimatologie—Klima geht uns alle an. Aber wie funktioniert es?* UTB.
- Spektrum.de. (2001). *LEXIKON DER GEOGRAPHIE: Solifluktion*. Spektrum Akademischer Verlag.
- [https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/solifluktion/7326#:~:text=Man%20unterscheidet%20zwischen%20gebundener%20Solifluktion,wulst%C3%B6rmige%20Zungen\)%20\(%20Abb.%20](https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/solifluktion/7326#:~:text=Man%20unterscheidet%20zwischen%20gebundener%20Solifluktion,wulst%C3%B6rmige%20Zungen)%20(%20Abb.%20)
- Weise, O. R. (1983). *Das Periglazial—Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen*. Gebr. Borntraeger.
- WMS Kanton Graubünden. (2022). *Geoportal der kantonalen Verwaltung—Luftbilder* [Web Map Service]. Geoportal des kantons Graubünden. wms.geo.gr.ch/luftbilder