



**Universität
Zürich** ^{UZH}

Geographisches Institut

Hangdynamik und Landschaftsentwicklung in der oberen Leventina: Fallbeispiel Anzonico

GEO 511 Masterarbeit

Eingereicht durch

Andrea Maria Strub

11-740-701

Betreut durch

Prof. Dr. Markus Egli

Fakultätsvertretung

Prof. Dr. Markus Egli

28.07.2017

Geographisches Institut, Universität Zürich

Dank

Ich danke meinem Betreuer Prof. Dr. Markus Egli für die Begleitung und konstruktive Kritik während des ganzen Arbeitsprozesses. Durch seine Hilfestellungen konnten entstandene Probleme rasch gelöst werden. Sandy Röthlisberger danke ich herzlich für ihre Hilfe bei der Laborarbeit.

Weiter bedanke ich mich beim ehemaligen Förster Lindo Grandi, welcher mich zu Beginn meiner Feldarbeit begleitete und mir interessante Informationen zum Untersuchungsgebiet sowie wichtige Kontakte vermittelte.

Ein grosser Dank gebührt auch meiner Schwester Ursina, die nicht nur während der Masterarbeit, sondern während des ganzen Studiums immer an meiner Seite stand und mir stets wertvolle Inputs gab. Nicht zuletzt bedanke ich mich herzlich bei meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglicht haben.

Zusammenfassung

Massenbewegungen wie Erdbeben, Bergstürze und Lawinen sind keine seltenen Phänomene in den Alpen. Bereits seit dem Rückzug der Gletscher um 16'000 cal BP kam es in der Leventina im Kanton Tessin immer wieder zu Naturereignissen. So erfolgte nahe des Dorfes Anzonico im Spätglazial (ca. 12'000 bis 14'000 cal BP) ein Bergsturz enormen Ausmasses. Mit einem Volumen von 530 Mio. m³ zählt er zu den grössten Bergstürzen in den Alpen und wurde zwischenzeitlich sehr gut erforscht.

In derselben Region, auf einer Höhe von ca. 1000-1500 m ü. M. wurde vor wenigen Jahren im Boden eine schwarze, schmierige Schicht entdeckt, welche bis anhin nur ansatzweise untersucht wurde und mögliche Hinweise auf eine erneute erhebliche Rutschung und somit einen Beitrag zur Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet liefern könnte.

Im Rahmen vorliegender Masterarbeit wurden in der oberen Leventina, oberhalb des Dorfes Anzonico, sieben Bodenprofile gegraben und deren Horizonte auf ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht. Weiter wurden ¹⁴C-Altersdatierungen vorgenommen und eine Digitalisierung von vergangenen Ereignissen und errichteten Schutzbauten im Untersuchungsgebiet gemacht. Das Ziel dieser Arbeit war es, einerseits herauszufinden, wie die schwarze Schicht, verglichen mit den übrigen Bodenhorizonten, zusammengesetzt ist und inwiefern sie für die untersuchte Region von Bedeutung ist bzw. ob sie eine potentielle Gefahr darstellen könnte. In einem zweiten Schritt wurde versucht, die Entwicklung der Landschaft seit dem Rückzug der Gletscher im Untersuchungsgebiet bruchstückhaft zu rekonstruieren.

Die physikalischen und chemischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die schwarze Schicht stark von den übrigen Bodenhorizonten im Gebiet abhebt. Insbesondere ein sehr hoher Mangan- und Eisen-Gehalt sowie die spezielle schmierige Konsistenz lassen vermuten, dass Redoxvorgänge und damit verbunden das Vorkommen von Wasser die Ursache der Zusammensetzung dieser speziellen Schicht sein könnten.

Es ist nicht auszuschliessen, dass die schwarze Schicht aufgrund der schmierigen Konsistenz eine potentielle Gefahr für zukünftige Rutschungen darstellt. Und dennoch weist die fortgeschrittene Pedogenese der Böden in unmittelbarer Nähe eher auf das Gegenteil hin. Ausserdem konnte nur ansatzweise bestimmt werden, über welches Gebiet sich die Schicht tatsächlich erstreckt.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit erstellte Chronologie der Landschaftsentwicklung zeigt deutlich, dass das untersuchte Gebiet seit dem Gletscherrückzug aktiv ist und es immer wieder zu grösseren und kleineren Naturereignissen kam.

An verschiedenen Stellen konnten einzelne Rutschungen mit Alter von 10'000 bis 3000 cal BP erfasst werden, wobei die instabilsten Regionen ausserhalb der Abrisszone des Bergsturzes von Chironico liegen. Die digitalisierten Ereignisse der letzten 60 Jahre sowie gemachte Beobachtungen während der Feldarbeit (z.B. Waldschneisen, Jungbaumwuchs, kleinere Rutschungen) zeigen, dass auch heute noch

eine beträchtliche Dynamik im Untersuchungsgebiet herrscht, welche das Errichten von Bauten zum Schutz der umliegenden Dörfer unerlässlich macht.

Inhalt

Zusammenfassung	I
Abbildungen	V
Tabellen.....	VI
Abkürzungen.....	VII
1 Einleitung und Übersicht	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.1.1 Definition Rutschung.....	1
1.1.2 Dispositionsmodell für Bergstürze	2
1.2 Ausgangslage	5
1.2.1 Bergsturz von Chironico	6
1.3 Ziele und Fragestellungen	9
1.4 Aufbau der Arbeit.....	9
2 Untersuchungsgebiet	10
2.1 Lage	10
2.2 Geologie.....	10
2.3 Eisausdehnung in der Leventina während des Letzten Glazialen Maximums (LGM).....	11
2.4 Klima.....	12
3 Methoden	15
3.1 Verwendetes Kartenmaterial.....	15
3.2 Feldarbeit.....	16
3.3 Probenaufbereitung	18
3.4 Physikalische Analysen.....	18
3.4.1 Bestimmung des Skelettgehaltes.....	18
3.4.2 Bestimmung der Bodenfarbe	18
3.5 Chemische Analysen	19
3.5.1 pH.....	19
3.5.2 C/N-Elementaranalyse	19
3.5.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)	20
3.5.4 Radiokarbondatierung (¹⁴ C-Altersbestimmung).....	21
3.6 Digitalisierung in ArcMap	23
4 Resultate.....	25
4.1 Feldarbeit.....	25
4.1.1 Profil 1	26

4.1.2 Profil 2	26
4.1.3 Profil 3	27
4.1.4 Profil 4	27
4.1.5 Profil 5	28
4.1.6 Profil 6	28
4.1.7 Profil 7	29
4.1.8 Einordnung der untersuchten Böden.....	29
4.1.9 Kartierung von Anrissstellen	29
4.2 Physikalische Analysen.....	32
4.2.1 Skelettgehalt.....	32
4.2.2 Bodenfarbe.....	33
4.3 Chemische Analysen	34
4.3.1 pH.....	34
4.3.2 Totaler Kohlenstoffgehalt (C _{tot})	34
4.3.3 Totaler Stickstoffgehalt (N _{tot})	35
4.3.4 C/N-Verhältnis.....	36
4.3.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)	37
4.3.6 ¹⁴ C-Altersbestimmung	42
4.3.7 Verwitterungsindex.....	43
4.4 Digitalisierung vergangener Ereignisse und Schutzbauten	44
5 Diskussion	48
5.2 Bodenchemie und -physik – schwarze Schicht vs. übrige Horizonte	48
5.3 Ausdehnung und potentielle Gefahr der schwarzen Schicht.....	51
5.4 Dynamik und Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet.....	52
5.4.1 Gletschergeschichte	52
5.4.2 Erfasste Rutschungen.....	52
5.4.3 Ereignisse während der letzten 60 Jahre	53
5.4.4 Chronologische Abfolge vergangener Ereignisse.....	55
6 Schlussfolgerung	59
7 Ausblick	60
8 Literatur.....	61
9 Anhang.....	67
Persönliche Erklärung.....	71

Abbildungen

Abb. 1: Allgemeines Dispositionsmodell.	2
Abb. 2: Paraglaziale Kurve (Church und Ryder 1972).....	3
Abb. 3: Kombination Dispositionsmodell und Paraglazialmodell.	4
Abb. 4: Klima sowie Bergsturz- und Rutschungsaktivität in den Alpen im Zeitbereich der letzten Eiszeit bis heute.	6
Abb. 5: Bergsturz von Chironico.	8
Abb. 6: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes.	10
Abb. 7: Geologie des Untersuchungsgebietes.	11
Abb. 8: Die Schweiz während des LGM vor ca. 24'000 Jahren.	12
Abb. 9: Klimadiagramm der Station Piotta (1981-2010) (MeteoSchweiz o. J.).....	13
Abb. 10: Jahresniederschlagssummen bei der Niederschlagsmessstation Faido (1982-2016).....	14
Abb. 11: Übersicht über die Profilstandorte, inkl. kartierter Anrissstellen.	17
Abb. 12: Schematische Darstellung des Prinzips der Röntgenfluoreszenzanalyse.	20
Abb. 13: Bodenprofil 1.	26
Abb. 14: Bodenprofil 2.	26
Abb. 15: Bodenprofil 3.	27
Abb. 16: Bodenprofil 4.	27
Abb. 17: Bodenprofil 5.	28
Abb. 18: Bodenprofil 6.	28
Abb. 19: Bodenprofil 7.	29
Abb. 20: Drei Beispiele von Anrissstellen im Untersuchungsgebiet.....	30
Abb. 21: Luftbild des Untersuchungsgebietes.....	30
Abb. 22: Foto des Untersuchungsgebietes.....	31
Abb. 23: Skelettgehalt (Material ≥ 2 mm) in % für alle sieben Profile und alle Horizonte.	32
Abb. 24: pH-Werte (gemessen mit CaCl_2) für alle sieben Profile bzw. alle Bodenhorizonte.....	34
Abb. 25: Totaler C-Gehalt aller Bodenhorizonte der Profile 1 bis 7 in g/kg.....	35
Abb. 26: Totaler N-Gehalt aller Bodenhorizonte der Profile 1 bis 7 in g/kg.....	36
Abb. 27: C/N-Verhältnis aller Bodenproben der Profile 1 bis 7.....	36
Abb. 28: Elementare Zusammensetzung des Profils 1 bei Anzonico in g/kg.....	38
Abb. 29 (a) und (b): Mn-Gehalt in den Horizonten der Profile 2 bis 7 bzw. des Profils 1 in g/kg.	39
Abb. 30: Fe-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.....	40
Abb. 31: Si-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.	41
Abb. 32: Al-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.....	41
Abb. 33: Kalibrierte ^{14}C -Alter (cal BP) der gesammelten Holzkohlepartikel bzw. Bodenproben einzelner Horizonte der Profile 1 bis 5.	43
Abb. 34: Berechneter Verwitterungsindex $(\text{K}+\text{Ca}) / \text{Ti}$ für die Profile 1 bis 7.	44

Abb. 35: Digitalisierte Karte.....	45
Abb. 36: Wasservorkommen im Untersuchungsgebiet.	46
Abb. 37: Wasserschutzzonen im Untersuchungsgebiet.....	47
Abb. 38: Mögliche Ausdehnung der schwarzen Schicht.....	51
Abb. 39: Möglicher, bruchstückhafter Ablauf der Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet zur Zeit des Hoch-, Spätglazials und Holozäns.....	58

Tabellen

Tab. 1: Übersicht über das verwendete Kartenmaterial.....	15
Tab. 2: Geographische Koordinaten der Bodenprofilstandorte.....	17
Tab. 3: Übersicht über die Bodenfarbe der einzelnen Horizonte – Profil 1 bis 7.....	33
Tab. 4: Übersicht über die Gehalte der neun wichtigsten Elemente in den Profilen 1 bis 7 in g/kg.	37
Tab. 5: Übersicht über das Alter einzelner Bodenhorizonte (cal BP), von Profil 1 bis 5.....	42

Abkürzungen

Chemische Elemente

Al	Aluminium
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
Fe	Eisen
K	Kalium
Mn	Mangan
N	Stickstoff
Na	Natrium
Si	Silizium
Ti	Titan

Sonstige

cal BP	Kalibrierte Jahre vor heute (Englisch: calibrated years Before Present)
GIS	Geographic Information System (Deutsch: Geoinformationssystem)
GPS	Global Positioning System (Deutsch: Globales Positionsbestimmungssystem)
LGM	Letztes Glaziales Maximum (Englisch: Last Glacial Maximum)
POM	Particulate Organic Matter
WRB	World Reference Base for Soil Resources (Bodenklassifikation)
SUPSI	Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana

1 Einleitung und Übersicht

1.1 Hintergrund

Im Kontext von Naturgefahren gilt die Schweiz als risikogefährdetes Land. Massenbewegungen wie Lawinen, Bergstürze und Erdbeben sind vor allem in den Alpen und Voralpen von zentraler Bedeutung. Es wird vermutet, dass mehr als 6% des Landes von Letzteren betroffen sind (Lateltin et al. 2005; Raetzo et al. 2002). Untersuchungen zeigen, dass zahlreiche Hänge kleinere Bewegungen aufweisen, welche grösstenteils mit postglazialen Rutschungsmechanismen zusammenhängen, oder durch fortschreitende Verwitterung entstehen, was zu einer Destabilisierung von Felswänden bzw. Hängen führen kann (Lateltin et al. 2005). Hangrutschungen kontrollieren den Sedimentfluss in tektonisch aktiven Gebirgsregionen und haben dadurch einen langzeitlichen Einfluss auf die Landschaftsentwicklung dieser Gebiete (Hovius et al. 1997).

Die genauen Ursachen und Mechanismen von solchen Hangbewegungen variieren von Ereignis zu Ereignis und sind laufend Gegenstand von Untersuchungen. So wird vor allem im Bereich der Entstehung und Entwicklung von grösseren Rutschungen sowie der Vorhersage von potentiell verheerenden Ereignissen geforscht, was zu ständigen Fortschritten in den Bereichen Risikoanalyse und -management führt (Lollino et al. 2015).

1.1.1 Definition Rutschung

Wie die Literaturrecherche zeigt, unterliegt der Begriff "Rutschung" (Englisch: landslide) keiner eindeutigen Definition (z.B. Cruden 1991; Lollino et al. 2015; Varnes 1978). Laut Varnes (1978) existieren zahlreiche mögliche Beschreibungen dafür, wobei eher von einem Überbegriff bzw. einer allgemeinen Definition für verschiedene Arten von Bewegungen und Materialien die Rede ist. Cruden und Varnes (1996) reduzieren sich folglich bei ihrer Beschreibung des Begriffs „Rutschung“ auf die zwei Wörter Material und Bewegungsart. Hierbei klassieren sie das Material in Gestein, Schutt und Boden/Erde. Beim Bewegungstypen unterscheiden sie zwischen Fallen, Strömen, Gleiten, Ausbreiten, und Stürzen. Basierend darauf definiert die Working Party on World Landslide Inventory (1990) den Begriff "Rutschung" wie folgt: "The movement of a mass of rock, earth or debris down a slope" – was auf Deutsch so viel wie "Die hangabwärts gerichtete Bewegung einer Masse von Gestein, Erde oder Schutt" bedeutet. Diese Begriffsdefinition wurde unter anderem auch dem Programm International Decade for Natural Disaster Reduction (1990-2000) vorgeschlagen (Cruden 1991).

In vorliegender Arbeit wird in Bezug auf die selbst erhobenen Daten der allgemeine Begriff Rutschung verwendet. Die bereits existierenden Daten zu vergangenen Ereignissen wurden von den entsprechenden Erfassern etwas genauer definiert, weshalb die entsprechenden Begriffe für diese Arbeit übernommen wurden.

1.1.2 Dispositionsmodell für Bergstürze

Auch die genauen Ursachen (Englisch: causes) und Auslöser (Englisch: triggers) von Rutschungen sind ein komplexes Thema, denn nur selten kann eine Rutschung einem einzelnen Auslöser zugeordnet werden. Viel mehr ist eine ganze Kette von vorhergegangenen Ereignissen und Einflüssen entscheidend, wobei es falsch ist, das als letztes Geschehene bzw. den *Trigger*, „...welcher das Fass zum Überlaufen gebracht hat“ (Büchi 2009) als alleinigen Verursacher zu definieren (Büchi 2009; Varnes 1978). Basierend auf dieser Theorie existiert ein allgemeines Dispositionsmodell (Abb.1), anhand dessen die Sensitivität von Gefahrenprozessen beurteilt wird (Kienholz et al. 1998; Mani und Caduff 2012). Dabei wird zwischen Grunddisposition und variabler Disposition unterschieden. Erstere beinhaltet die Eigenschaften bzw. Parameter eines Systems, welche über längere Zeiträume stabil sind (z.B. Geologie, Klima oder Relief), wobei einzelne davon einen bestimmten längerfristigen Entwicklungstrend aufweisen können, was schliesslich zu einer Erhöhung der Grunddisposition führen kann. Die variable Disposition hingegen ist bei gegebener Grunddisposition zeitlich variabel. Sie umfasst die sich mit der Zeit verändernden Eigenschaften (z.B. meteorologische Situation), welche die Schwelle der Prozessauslösung beeinflussen (Kienholz et al. 1998; Mani und Caduff 2012). Die dritte Komponente ist das auslösende Ereignis, welches den entsprechenden gefährlichen Prozess bei gegebener Disposition in Gang setzt (Aeberhard et al. 2013).

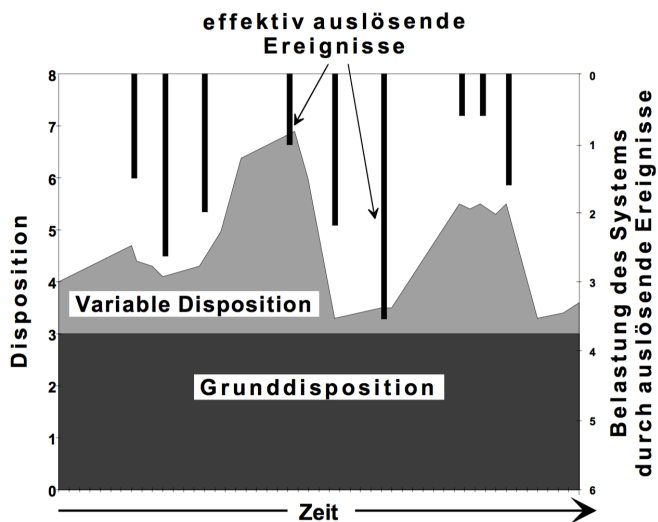


Abb. 1: Allgemeines Dispositionsmodell.

Die hellgraue Färbung stellt die variable Disposition dar. Die Grunddisposition ist dunkelgrau gefärbt. Ein Beispiel für die schwarzen Balken, welche die effektiv auslösenden Ereignisse zeigen, ist die Niederschlagsmenge (Mani und Caduff 2012).

Da sich die Grunddisposition, wie erwähnt, in einzelnen Fällen über längere Zeit hinweg leicht verändern kann, kombinierte Büchi (2009) das Dispositionsmodell im Falle von Bergstürzen mit dem Paraglacial-Modell, welches sich um die Geomorphologie im Anschluss an Vereisungen dreht. Das Paraglacial-Modell berücksichtigt langfristige klimatische Veränderungen und ermöglicht die Modellierung der damit

verbundenen geomorphologischen Reaktionen (Ballantyne 2002; Büchi 2009). Eine Kombination dieser zwei Modelle weicht hauptsächlich in folgenden Punkten vom gewöhnlichen Dispositionsmodell ab (Büchi 2009):

- Die Grunddisposition wird nicht als konstant betrachtet, sondern folgt langfristig der paraglazialen Kurve nach Church und Ryder (1972) (Abb. 2), die dem typischen Verlauf des Sedimentertrages entspricht. Demnach ist anschliessend an eine Vergletscherung ein maximaler Ertrag (verbunden mit grosser Sedimentproduktion) zu verzeichnen, welcher bis zum Erreichen der geologischen Norm immer kleiner wird. Damit verbunden ist die Theorie, dass sich die Instabilität eines Hanges nach jedem Bergsturzereignis reduziert und die Wahrscheinlichkeit eines erneuten Ereignisses mit jedem Niedergang sinkt (Cruden 1997).
- Der Typ des Auslösers wird offengelassen.
- Die Zeitachse erhält eine Dimension.

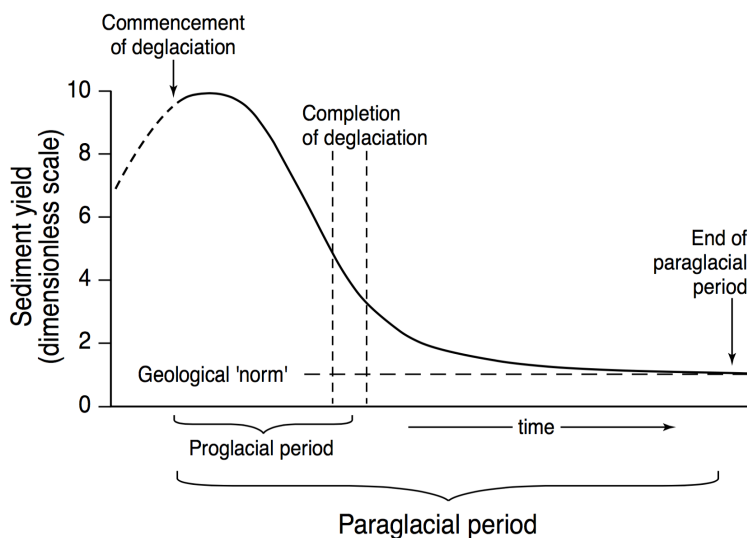


Abb. 2: Paraglaziäle Kurve (Church und Ryder 1972).

Entspricht dem typischen Verlauf des Sedimentertrages mit maximalem Ertrag direkt nach der Vergletscherung. Der Ertrag nimmt anschliessend immer mehr ab, bis die geologische Norm erreicht ist.

Abb. 3 zeigt ein entsprechendes Beispiel. Die Summe der Grunddisposition (gesteuert durch langfristige Veränderungen) und der variablen Disposition (gesteuert durch mittelfristige Klimaschwankungen) ergibt die Gesamtdisposition. Wird diese durch die Intensität eines Auslöseereignisses überschritten, so kommt es zu einem Bergsturz bzw. Rutschung. Hierbei existieren verschiedene Konstellationen. Extreme Regenfälle oder Erdbeben gelten als häufige Auslöser (Büchi 2009).

Da die Grunddisposition und folglich auch die Gesamtdisposition nach Ballantyne (2002) und Poschinger (2002) durch Verwitterungsvorgänge wieder zunehmen kann, ist mit der gestrichelten Linie ein ergänzender Kurvenverlauf dargestellt (Büchi 2009).

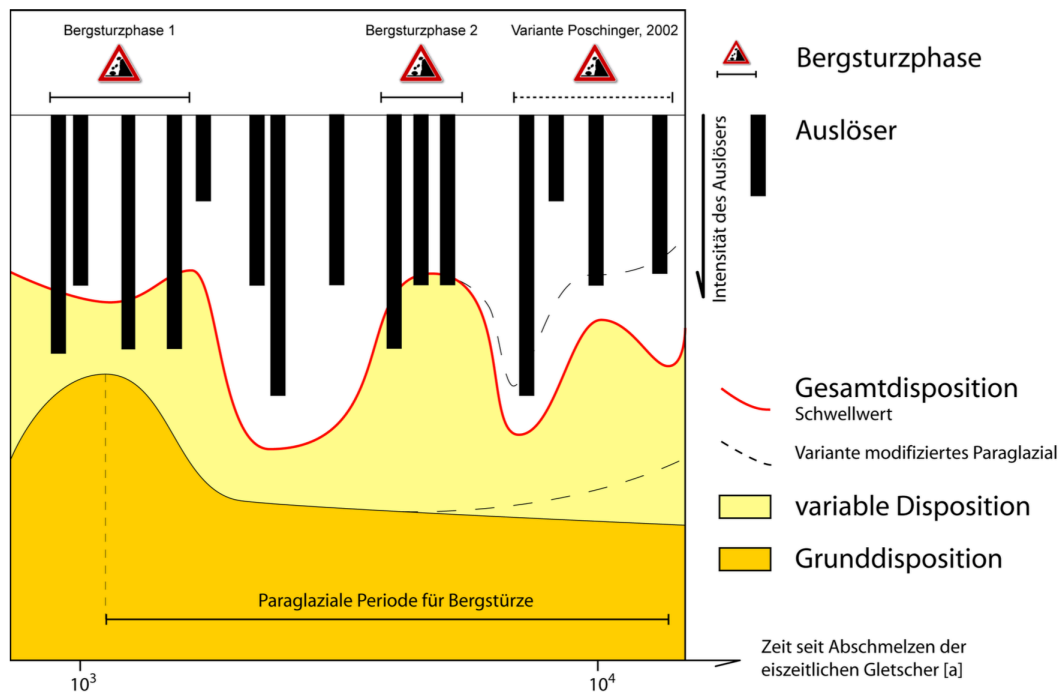


Abb. 3: Kombination Dispositionsmodell und Paraglacialmodell.

Beispiele von Bergsturzereignissen anhand der kombinierten Modelle. Die Gesamtdisposition ergibt sich aus der Summe der Grunddisposition und der variablen Disposition (Büchi 2009).

Um dieser Ursachen und Auslöser-Problematik entgegen zu wirken, hat die Working Party on World Landslide Inventory Checklisten mit Ursachen von Rutschungen erstellt, welche wie folgt unterteilt sind und einen Kompromiss zwischen Nutzen und Vollständigkeit darstellen sollen (Popescu 1994):

- Bodenverhältnisse
- Geomorphologische Prozesse
- Physische Prozesse
- Künstliche (menschliche) Prozesse

In vorliegender Arbeit wird hauptsächlich auf die Bodenverhältnisse im Gebiet oberhalb von Anzonico eingegangen, indem detaillierte Bodenuntersuchungen gemacht wurden. Ergänzend dazu wurde versucht, Verbindungen zu geomorphologischen und physischen Prozessen herzustellen, indem beispielsweise die Geologie sowie klimatische Ereignisse berücksichtigt wurden.

1.2 Ausgangslage

Lange wurde der Rückzug von Gletschern, welcher häufig steile instabile Felsflanken und Hangentlastungen mit sich bringt, als Hauptauslöser von periglazialen Bergstürzen und Hangbewegungen vermutet (Ballantyne 2002; McColl 2012; Prager et al. 2008). Verschiedene Untersuchungen mit absoluten Altersdatierungen zeigen jedoch, dass die Ereignisse meist nicht direkt nach der letzten Eiszeit, sondern erst einige tausend Jahre später stattgefunden haben (z.B. Gruner 2006; Ivy-Ochs et al. 2009; Prager et al. 2008). Es wird deutlich, dass besonders im frühen Holozän bzw. Postglazial (ca. 10'500-9'400 cal BP¹) in den Alpen vermehrt Hangrutschungen und Bergstürze registriert wurden (Prager et al. 2008; Soldati et al. 2004) und somit weitere Faktoren als Ursache bzw. Auslöser in Frage kommen.

Abb. 4 zeigt einen Überblick über die Interaktion zwischen dem Klima und der Aktivität von Sturzereignissen in den Alpen seit der letzten Eiszeit. Es wurden Vergleiche zwischen vergangenen Ereignissen bzw. erhöhter Bergsturzaktivität (Gruner 2006) und den Rückzugsphasen Schweizer (Joerin et al. 2006) und Österreichischer Gletscher (Nicolussi und Patzelt 2000), Phasen erhöhter Rutschungsaktivität in den Schweizer Alpen (Dapples et al. 2003) und den Italienischen Dolomiten (Soldati et al. 2004) sowie dem Feuchtigkeitsindex (Ruch und Kunz 2001) gezogen. Auffallend ist, dass vor allem zu Beginn des Holozäns Bergsturzereignisse mit eher feuchten Bedingungen bzw. einem positiven Feuchtigkeitsindex korrelieren (Dapples et al. 2003; Gruner 2006). Hingegen sieht man keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den einzelnen Gletscherrückzugsphasen (Joerin et al. 2006) und erhöhter Bergsturzaktivität (Gruner 2006). Beispielsweise wurden während der grössten Warmphase (sog. Klimaoptimum), beim Übergang vom älteren zum jüngeren Atlantikum (ca. 7000 cal BP), keine Bergstürze registriert (Gruner 2006). Dies unterstreicht die Beobachtungen, dass Sturzereignisse nicht immer in direkter Verbindung mit Gletscherrückzügen stehen, sondern dass auch anderen Faktoren, wie z.B. die Feuchtigkeit entscheidend sind.

Wie aus Abb. 4 ersichtlich ist, gab es auch in der oberen Leventina ein markantes Ereignis (siehe rote Umkreisung). Nahe Chironico und Anzonico ereignete sich ein Bergsturz, welcher auf ein spätglaziales Alter von 12'000-14'000 cal BP datiert und bereits relativ gut erforscht wurde (siehe Kapitel 1.2.1) (Antognini und Volpers 2002; Claude et al. 2014). Im selben Gebiet auf einer Höhe von ca. 1000-1500 m ü. M. haben einheimische Förster eine schwarze, schmierige Schicht im Boden entdeckt, welche sich in einer Tiefe von 1-1.5 m befindet und an einem Standort bereits ansatzweise von Egli und Ivy-Ochs (2009) untersucht wurde. Es ist nicht auszuschliessen, dass diese Schicht Hinweise auf eine erneute grosse Rutschung und somit weitere Erkenntnisse zur Landschaftsentwicklung des Untersuchungsgebietes liefern könnte.

¹ cal BP = kalibrierte Jahre vor heute mit Bezugsjahr 1950 (Prager et al. 2008).

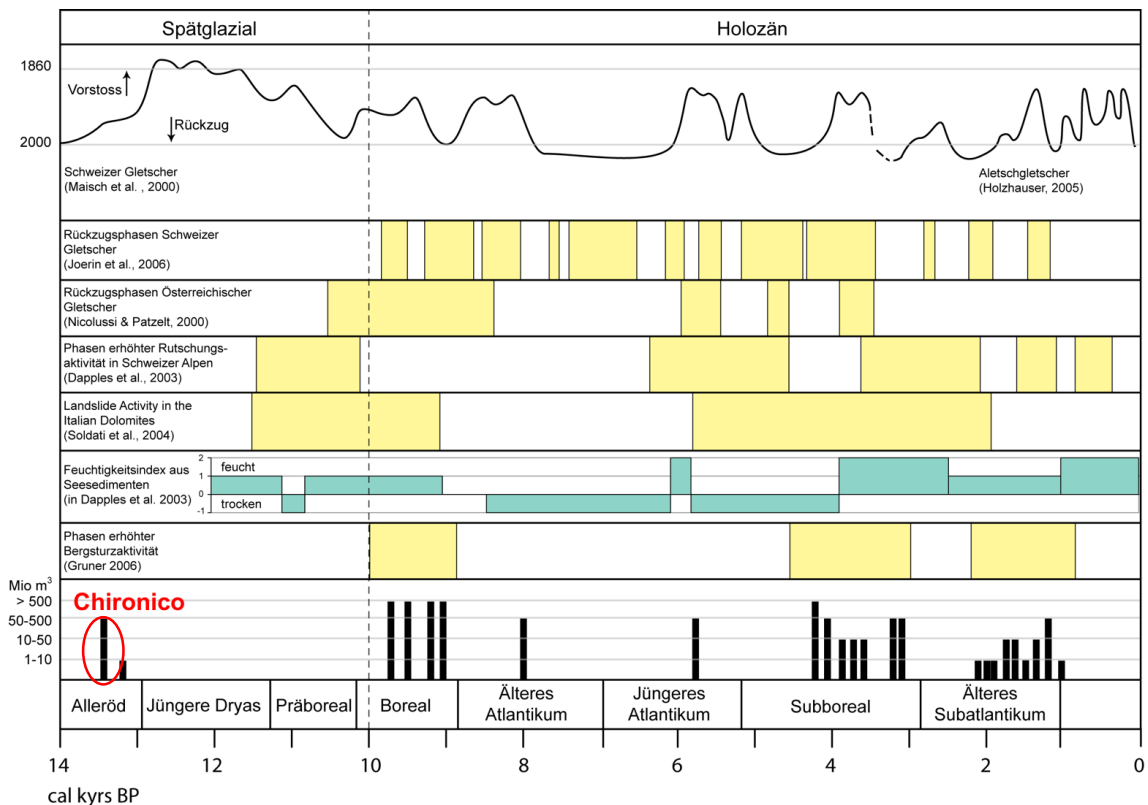


Abb. 4: Klima sowie Bergsturz- und Rutschungsaktivität in den Alpen im Zeitbereich der letzten Eiszeit bis heute. Die Säule ganz links (rote Umkreisung) zeigt den datierten Zeitpunkt des Bergsturzereignisses von Chironico. Die übrigen schwarzen Säulen stellen weitere Bergstürze in anderen Gebieten dar. Die Höhe der Säulen gibt das jeweilige Volumen der entsprechenden Bergstürze an (Büchi 2009 basierend auf: Dapples et al. 2003; Gruner 2006; Joerin et al., 2006; Maisch 2000; Ruch und Kunz 2001, ergänzte Darstellung).

1.2.1 Bergsturz von Chironico

Bereits in der Vergangenheit wurde der Bergsturz von Chironico mehrfach erforscht (Antognini und Volpers 2002; Dal Vesco 1979; Schardt 1910). Die Meinungen über dessen Ursprung gehen teilweise weit auseinander. Schardt (1910) behauptete, das Ereignis könne nicht glazialen Ursprungs sein. Einerseits aufgrund der Morphologie der Schuttmasse, die parallel zum Tal liegt, andererseits wegen der Zusammensetzung des Materials, welches lediglich aus Leventina-Granit-Gneis besteht. Weiter begründet er seine Annahme mit der Anordnung der Gesteinsblöcke, die nicht mit Moränen in Verbindung gebracht werden kann. Nägeli (1920) hingegen sprach in seiner Dissertationsarbeit von einem postglazialen Bergsturz. Er erwähnte das Vorkommen von geringen Mengen an glazialen Material innerhalb der Ablagerungsmasse, das er als vom Bergsturz mitgerissen interpretierte. Auch in Bezug auf das Ereignis an sich gibt es unterschiedliche Ansichten.

Dal Vesco (1979) und Nägeli (1920) sind überzeugt, dass es sich beim Bergsturz von Chironico um zwei verschiedenen Events handelt, zwischen denen lediglich eine kurze Zeitspanne liegt. Nägeli (1920) kartierte das Ablagerungsmaterial, wobei er es in einen nördlichen und einen südlichen Teil gliederte. Dal Vesco (1979) begründet seine Vermutung anhand der Morphologie der Gesteinsblöcke, die sich von der Grösse

her unterscheiden. Einigkeit unter den verschiedenen Forschern besteht hinsichtlich des Abrissgebietes, das sich Analysen zu Folge auf der östlichen Talseite auf einer Höhe von ca. 1500 m ü. M. befindet (Abb. 5) (Dal Vesco 1979; Nägeli 1920; Schardt 1910).

Einige Jahre später erfolgten ^{14}C -Datierungen von in Bohrlöchern gefundenen Holzfragmenten, welche Alter von $11'340 \pm 80$, $11'690 \pm 85$ und $11'500 \pm 80$ ^{14}C Jahren BP ergaben (Antognini und Volpers 2002). Aufgrund des Standortes der gefundenen Holzproben stellen diese Werte jedoch nur ein minimales Alter dar (Antognini und Volpers 2002).

Infolge der vielen Unsicherheiten versuchte Claude (2012) das bis dahin vorhandene Wissen zum Bergsturz von Chironico anhand ihrer Masterarbeit zu erweitern. Sie beschäftigte sich im Speziellen mit der Thematik der Anzahl Ereignisse und des genauen Alters des Bergsturzes, indem sie erneut absolute Datierungen des Ablagerungsmaterials vornahm. Weiter untersuchte sie mögliche Auslösungsmechanismen und das Ausmass bzw. Volumen des Bergsturzes. Durch Kartierungen, Datierungen (^{10}Be , ^{36}Cl) und Modellierungen des Leventinatals vor dem Bergsturz erlangte sie unter anderem folgende Resultate (Claude 2012):

- Das Volumen der Bergsturzmasse beträgt ca. 530 Mio. m^3 und zählt somit zu den grössten Bergstürzen in den Alpen in kristallinem Gestein.
- Die verschiedenen absoluten Datierungen (Oberflächen-Expositionsalter und ^{14}C -Alter von Holz) stimmen gut überein und ergaben ein Alter von $13'380 \pm 1400$ cal BP, was darauf hindeutet, dass es sich zusätzlich um einen der ältesten Bergstürze in den Alpen handelt.
- Seit ca. 16'000 bis 17'000 Jahren scheint das Tal eisfrei zu sein.
- Beim Bergsturz von Chironico handelt es sich um einen einzigen Event, welcher ca. 3000 Jahre nach dem Rückzug der Gletscher stattfand und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht direkt durch diesen ausgelöst wurde. Dennoch hat der Rückzug steile und instabile Talflanken hinterlassen, wobei auf der östlichen Hangseite ein sogenannter *dip-slope* (Oberfläche ist in gleiche Richtung und mit gleichem Winkel wie das darunterliegende Gestein geneigt (Allaby 2008)) gebildet wurde.
- Mehrere Indizien (z.B. Lithologie, Form und Ausdehnung des Ablagerungsmaterials) beweisen, dass die Abrissstelle, wie bereits vermutete, auf der östlichen Talseite zu finden ist.
- Da in der Zeit des Bergsturzereignisses erhöhte seismische Aktivität nahe Luzern registriert wurde, ist auch ein Erdbeben als Auslöser nicht auszuschliessen.

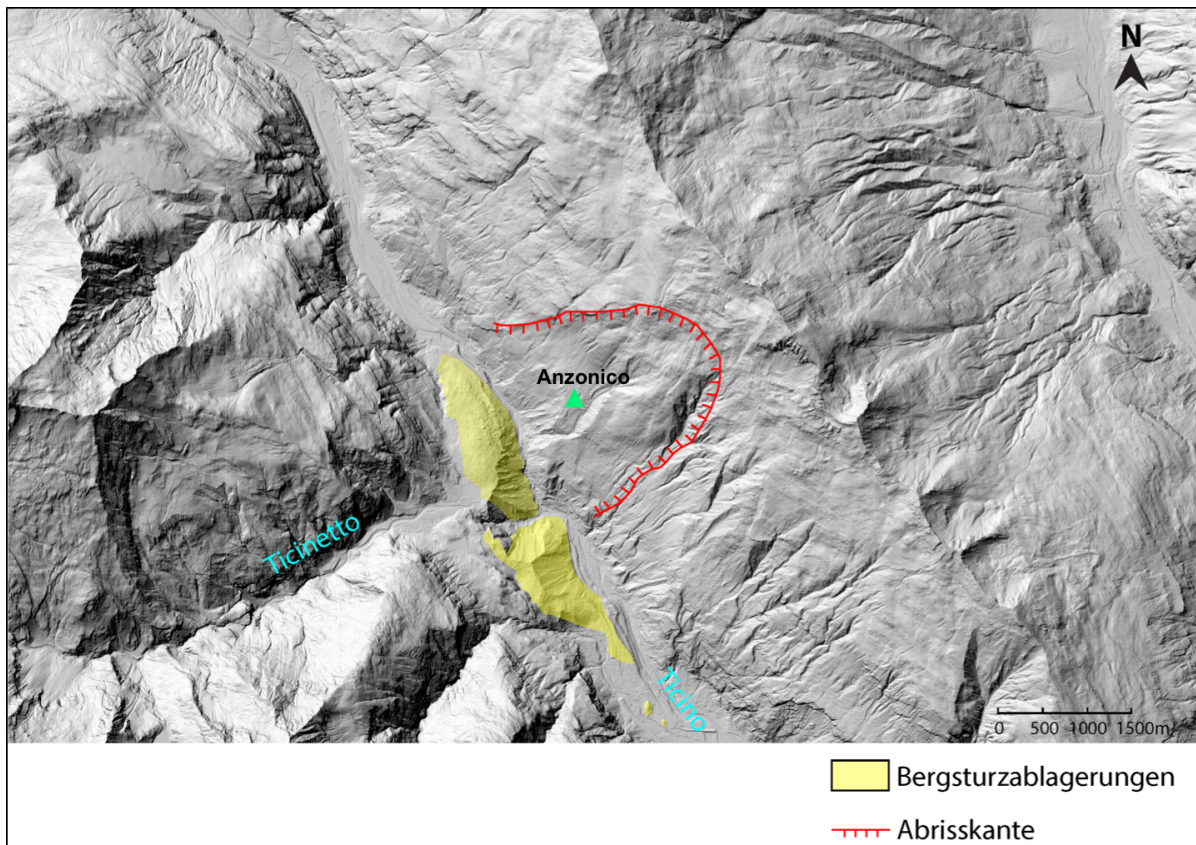


Abb. 5: Bergsturz von Chironico.

Das Ablagerungsmaterial des Bergsturzes ist gelb markiert. Die rote Linie stellt die Abrisskante des spätglazialen Bergsturzes von Chironico dar. Der Ticino, welcher durch den Bergsturz blockiert wurde, hat seinen Fliessweg anschliessend auf der östlichen Talseite fortgesetzt (Darstellung nach Claude et al. 2014).

1.3 Ziele und Fragestellungen

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, anhand von Bodenuntersuchungen die genaue Zusammensetzung der beobachteten schwarzen Schicht zu analysieren, mit anderen Bodenhorizonten zu vergleichen, absolute Datierungen durchzuführen sowie deren räumliche Ausdehnung mittels Kartierung und GIS festzuhalten. Eine Analyse der erhaltenen Resultate sollte bruchstückhafte Informationen über die Entwicklung der Landschaft im Untersuchungsgebiet liefern und Auskunft über eine mögliche weitere Rutschung geben. Anhand nachfolgender Fragestellungen wurde versucht, die genannten Ziele zu erreichen:

- 1) Wie sieht die Zusammensetzung der „misteriösen“ schwarzen Schicht verglichen mit den übrigen Bodenhorizonten aus?*
- 2) Über welches Gebiet erstreckt sich die schwarze Schicht?*
- 3) Liefert eine Analyse der schwarzen Schicht Anzeichen für künftig grössere Rutschungen im Untersuchungsgebiet?*
- 4) Wo können einzelne Rutschungen im Untersuchungsgebiet erfasst werden und wie sieht die Landschaftsentwicklung bzw. -dynamik im Untersuchungsgebiet aus?*

1.4 Aufbau der Arbeit

In vorliegender Masterarbeit wird in einem ersten Teil das Untersuchungsgebiet näher beschrieben, wobei verschiedene, das Gebiet prägende Aspekte betrachtet werden. In Kapitel 3 folgt eine Erläuterung der verwendeten Materialien und Methoden. Anschliessend werden die erlangten Resultate anhand von erstellten Graphiken und Abbildungen detailliert beschrieben und im darauffolgenden Kapitel analysiert, verknüpft und umfänglich diskutiert. Die Schlussfolgerung und der Ausblick in Kapitel 6 bzw. 7 runden die Arbeit ab.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Lage

Das Forschungsgebiet befindet sich im Kanton Tessin, im Leventinatal, welches sich von Airolo bis nach Biasca erstreckt und vom Fluss Ticino durchflossen wird. Die Untersuchungen wurden auf den oberen Teil der Leventina beschränkt, genauer auf das Terrain oberhalb des Dorfes Anzonico, auf der östlichen Talseite. Die ganze Region ist mit Hangneigungen von 30° bis 40° relativ steil und grösstenteils bewaldet (Hangneigungsklassen ab 30° , swisstopo, Datenstand: 2016). Die Untersuchungen wurden an drei verschiedenen Standorten (Anzonico, Singiasco und Suaggia) (Abb. 6) im Umkreis von ca. 1 km Luftlinie durchgeführt.

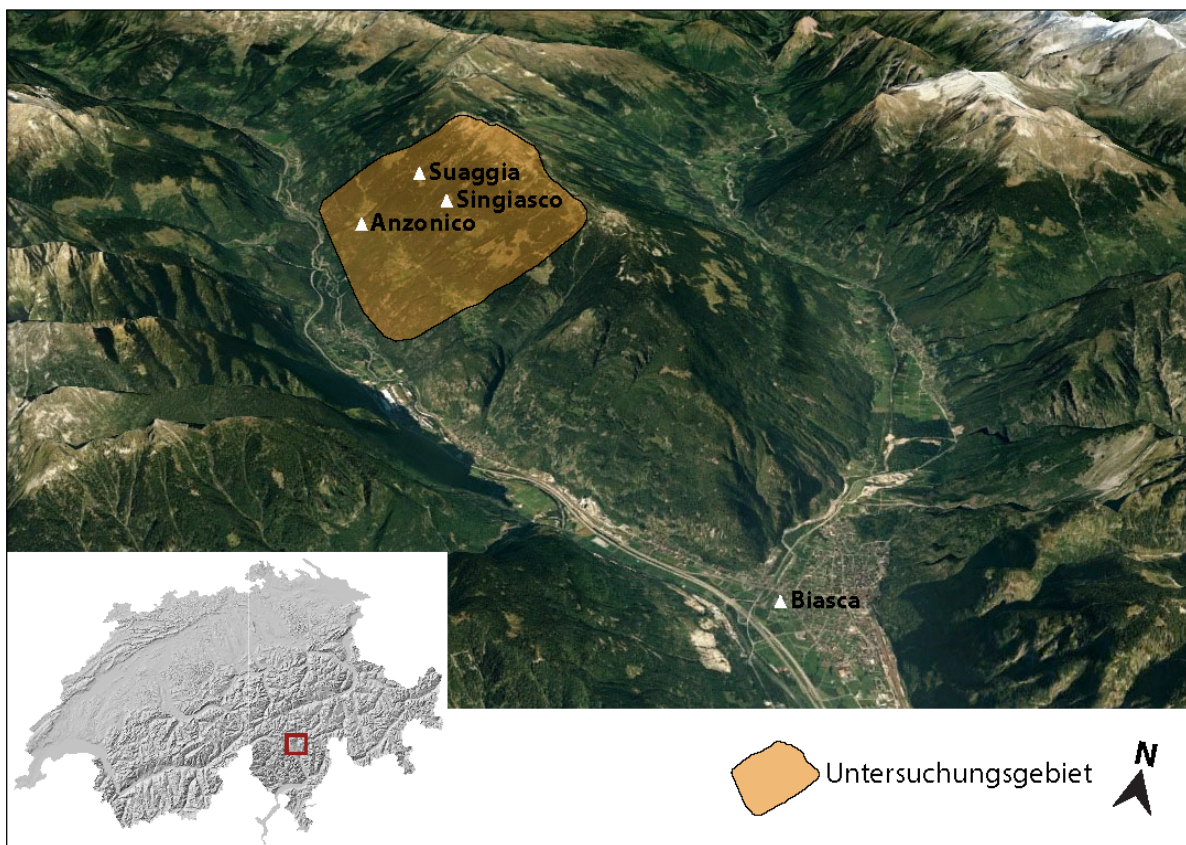


Abb. 6: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes.

(Google Earth; SwissALTI3D, swisstopo, Datenstand: 2017, ergänzte Darstellung).

2.2 Geologie

Geologisch gesehen, gehört die Leventina der östlichen Teilkuppe der Maggia-Querzone an (Abb. 7) und ist Teil der sogenannten Tessiner Kulmination (Möbus 1997). Letztere entstand durch das Anheben des alpinen Deckenstapels im Nordtessin entlang einer Nord-Süd-Achse. Dieser Prozess hatte das beidseitige

Einsinken der Penninischen Decken nach Osten und Westen zur Folge, was einen tiefen Einblick in den Deckenaufbau gestattet (Richter 1974; Weissert und Stössel 2015).

Das Untersuchungsgebiet ist den unteren Penninischen Decken, genauer der Leventina-, Lucomagno- und der Simano-Decke zuzuordnen (Antognini und Volpers 2002; Preiswerk et al. 1934). Im Süden sind sie durch die Insubrische Linie von den südlichen Alpen abgegrenzt, während sie im Norden zusammen mit dem Gotthardmassiv eine weitere Abgrenzung bilden (Maxelon und Mancktelow 2005). Die Leventina-Decke nimmt gegen Norden hin in ihrer Mächtigkeit ab (Niggli et al. 1934), ist ausschliesslich in der Valle Leventina zu finden und besteht im Kern aus einem langgestreckten Granitgneiskörper, der auf beiden Talseiten aufgebaut wurde und als tiefste Deckeneinheit gilt. Das Gebiet wird daher vom sogenannten Leventina-Orthogneis dominiert, welcher häufig eine typische Augengneistextur aufweist (Claude et al. 2014; Möbus 1997; Niggli et al. 1934; Preiswerk et al. 1934). Vermutungen lassen daraus schliessen, dass dieser Orthogneis mehr oder weniger autochthon verankert ist (Möbus 1997). Auffallend ist die in Kap. 1.2.1 erwähnte Foliation, die um $25^\circ - 30^\circ$ nach SSW geneigt ist und einen *dip-slope* auf der östlichen Talseite bildet (Antognini und Volpers 2002).

An einigen Stellen in der Region sind quartäre glaziale Ablagerungen und Rutschungsmaterial zu finden (GeoCover – Vektordaten, swisstopo, Datenstand: 2014).

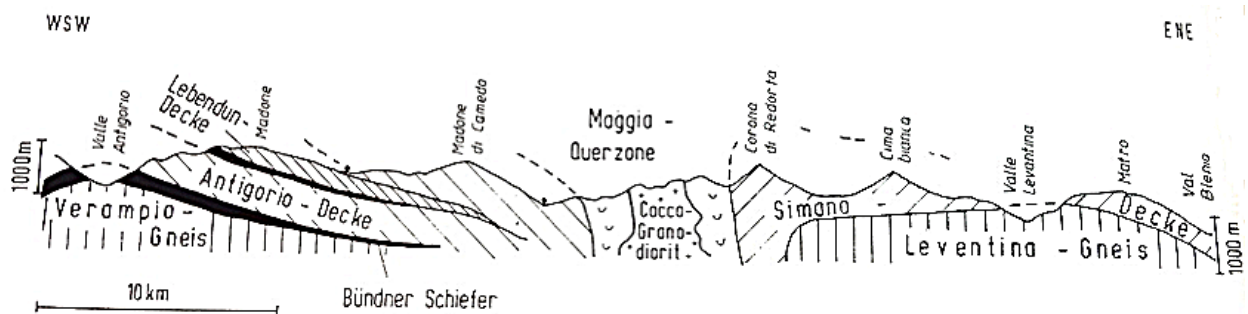


Abb. 7: Geologie des Untersuchungsgebietes.

Profil durch die Maggia-Querzone (Möbus 1997, nach Gwinner 1971).

2.3 Eisausdehnung in der Leventina während des Letzten Glazialen Maximums (LGM)

Laut Bini et al. (2009) war das ganze Leventinatal während des letzteiszeitlichen Maximums vor ca. 24'000 Jahren beinahe vollständig mit Eis bedeckt (Abb. 8). Lediglich ein paar wenige Nunatakker auf den Bergspitzen sollen unvergletschert geblieben sein. Aufgrund der lückenhaften Datenlage (z.B. fehlende Seitenmoränen durch steile Talflanken oder durch Sturzmassen überdeckte Talböden) (Hantke 1983) stellt sich eine genaue Rekonstruktion des Gletscherrückzugs im Untersuchungsgebiet als schwierig heraus. Hanke (1983) vermutet in der Leventina und in der Region zwischen Biasca und Bellinzona mehrere Eisränder, welche älter als das Gschnitz-Stadial (ca. 16'000-17'000 Jahre BP) sind. Auch Renner (1982), die das Airolo-Stadial mit dem Gschnitz-Stadial gleichsetzt, hat keine Stadiale in der Leventina beobachtet,

die ein jüngeres Alter aufweisen. Diese Feststellungen deuten darauf hin, dass die Valle Leventina anschliessend an das Gschnitz-Stadial, d.h. seit 16'000 bis 17'000 cal BP eisfrei ist (Claude et al. 2014).



Abb. 8: Die Schweiz während des LGM vor ca. 24'000 Jahren.

Das rote Dreieck markiert den Standort des Dorfes Anzonico (Bini et al. 2009, ergänzte Darstellung). Mit Ausnahme von ein paar Nunatakkern (Pizzo Erra, Pizzo Alto) war das ganze Untersuchungsgebiet vereist.

2.4 Klima

Klimatisch gesehen gehört die obere Leventina zur Alpensüdseite, die von milden mediterranen Luftmassen beeinflusst wird und dadurch in vielen Gebieten erhöhte Temperaturen aufweist. Dennoch können die Werte in den Winter- und Frühlingsmonaten auch mal unter 0° C fallen. Trotz der hohen Anzahl Sommertage gilt die Alpensüdseite als eines der niederschlagreichsten Gebiete des Landes. Vor allem im Frühjahr (Mai) und im Herbst (September und Oktober) zeigt die Statistik hohe monatliche Niederschlagssummen. Die Anzahl Niederschlagstage ist aber gering, was auf starke einzelne Ereignisse mit 150 bis 400 mm pro Tag hindeutet. Dies kann entlang des südlichen Alpenhauptkamms grössere Neuschneemengen mit sich bringen (Crocchi-Maspoli et al. 2014).

Abb. 9 liefert detailliertere Informationen zum Klima im Untersuchungsgebiet. Dargestellt ist das Klimadiagramm für die am nächsten bei Anzonico gelegenen und Niederschlag sowie Temperatur messende Meteostation Piotta (990 m ü. M.). Die beschriebene Niederschlagsverteilung mit einem Maximum in den Monaten Mai, September und Oktober wird deutlich widerspiegelt. Auch ein Blick auf die Normwerte von 1961-1990 und 1981-2010 (MeteoSchweiz o. J.) bestätigt diese Angaben und bekräftigt die Aussage, dass die Alpensüdseite als die niederschlagreichste Region der Schweiz gilt.

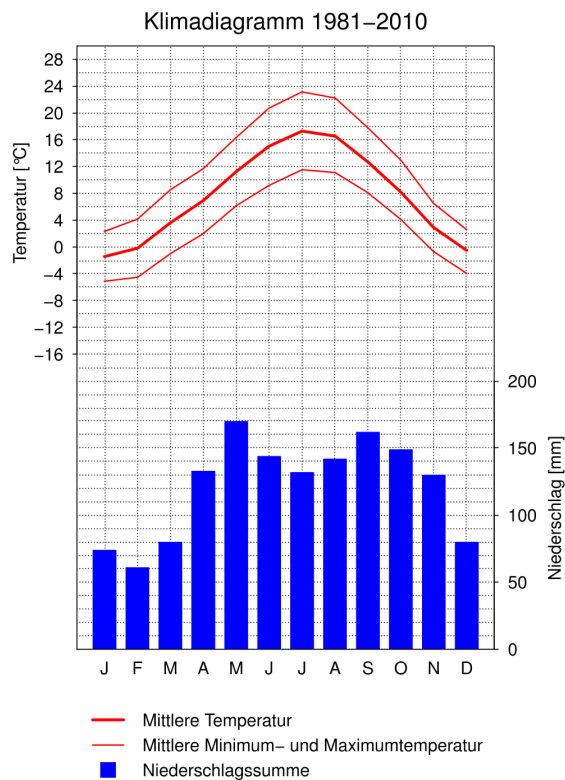


Abb. 9: Klimadiagramm der Station Piotta (1981-2010) (MeteoSchweiz o. J.).
 Maximale Niederschlagsmengen in den Monaten Mai, September und Oktober.

Ein Blick auf die jährlichen Niederschlagssummen der vergangenen 30 Jahre (Niederschlagsmessstation Faido, 747 m ü. M.), zeigt Werte zwischen 715 und 2180 mm, wobei hauptsächlich die Jahre 1987, 1993, 2000, 2002 und 2008 herausstechen (Abb. 10) (MeteoSchweiz 2017). In den Jahren 2003 sowie 2005 ist sehr wenig Niederschlag gefallen, was im 2003 wohl auf den Hitzesommer zurückzuführen ist. Im Jahr 2005 ist der Wert sehr tief, obwohl es damals im August in der ganzen Schweiz extreme Niederschläge und teilweise grössere Überschwemmungen gab (MeteoSchweiz o. J.). Die Tageswerte zeigen, dass aber während der restlichen Monate verhältnismässig wenig Niederschlag fiel (MeteoSchweiz 2017).

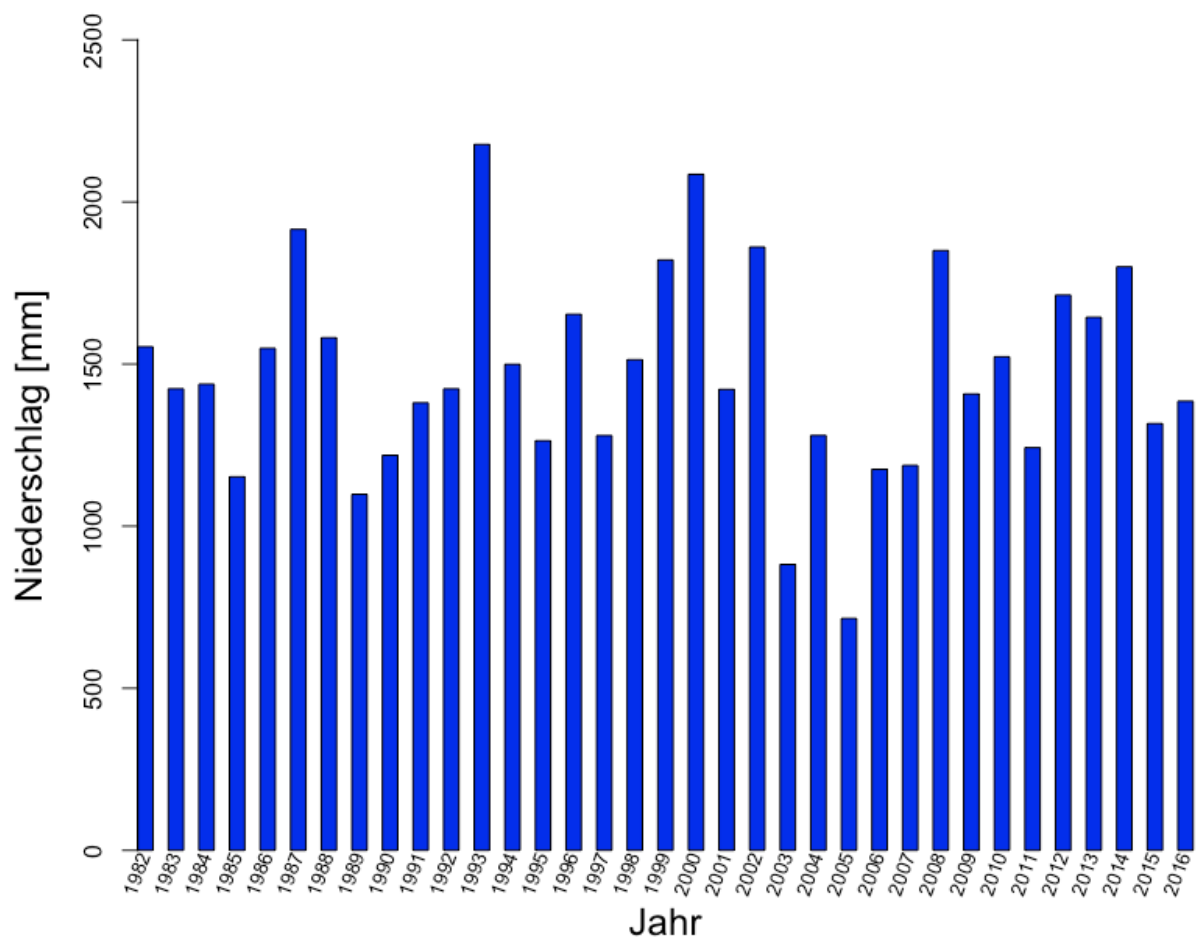


Abb. 10: Jahresniederschlagssummen bei der Niederschlagsmessstation Faido (1982-2016).

Markant sind v.a. die Jahre 1987, 1993, 2000, 2002 und 2008 (Datengrundlage: MeteoSchweiz 2017).

3 Methoden

3.1 Verwendetes Kartenmaterial

Verschiedene Kartenportale liefern nützliche Unterlagen, um einen guten Überblick über das Untersuchungsgebiet zu erhalten und erlauben eine exakte Kartierung sowie eine Analyse der Landschaftsentwicklung eines bestimmten Gebietes. Tab. 1 stellt eine Übersicht über das in dieser Studie verwendete Kartenmaterial dar.

Tab. 1: Übersicht über das Kartenmaterial, welches für die Feldarbeit und die übrigen Arbeitsprozesse verwendet wurde (BAFU; Google Earth; swisstopo).

BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAPHIE SWISSTOPO	
Digitale Landeskarte (Datenstand: 2008)	1:25'000. Topographische Karte mit detaillierter Darstellung des Verkehrs, der Siedlungen sowie des Geländes und der Vegetation. Blattschnittfreier Datensatz.
Digitale Landeskarte (Datenstand: 2016)	1:10'000. Topographische Karte mit sehr detaillierter Darstellung des Verkehrsnetzes, der Siedlungen sowie des Geländes und der Vegetation, ergänzt mit Felszeichnungen und dem Relief.
SwissALTI3D (Datenstand: 2017)	Hoch aufgelöstes digitales Höhenmodell, welches die Geländeformen der Schweiz und des Fürstentums Lichtenstein ohne Bebauungen und Bewuchs darstellt.
GeoCover Vektordaten (Datenstand: 2014)	Basierend auf den Blättern des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 (GA25). Bestmögliches Abbild der oberflächennahen Geologie.
Luftbilder der Schweiz	Luftaufnahmen (Luftbilder und –streifen), die aus Flugzeugen mit analogen bzw. digitalen Kameras erstellt wurden. Der LUBIS-Viewer ermöglicht deren Betrachtung. Im Untersuchungsgebiet sind Aufnahmen von 1946-2005 erhältlich.
Hangneigungsklassen ab 30° (Datenstand: 2016)	Aus dem digitalen Höhenmodell SwissALTI3D abgeleitet.
BUNDESAMT FÜR UMWELT ABTEILUNG WASSER (BAFU)	
Grundwasserschutzzonen (Datenstand: 2013)	Element der von den Kantonen erstellten und dem BAFU zugestellten Gewässerschutzkarten. Schweizweit harmonisierte Daten.
BINI et al. (2009)	
Letztes Glaziales Maximum (LGM) (Datenstand: 2008)	Darstellung der grössten Gletscherausdehnung in der Schweiz vor 24'000 Jahren, Massstab 1:500'000.
GOOGLE	
Google Earth	Darstellung von Satellitenbildern in 2D und 2.5D.

3.2 Feldarbeit

Mithilfe eines Bohrstocks, Pürckhauer genannt, wurden passende Stellen für die Erstellung der Bodenprofile definiert. Dazu war eine ausgedehnte Feldbegehung notwendig. Die Auswahl der Standorte erfolgte aufgrund von Beobachtungen und Angaben des lokalen Försters. Er bemerkte die erwähnte schwarze Schicht wiederholt beim Errichten von Rutschungsverbauungen. Basierend darauf wurden insgesamt sieben Stellen für die Bodenprobenahme bestimmt. Von Hand wurde versucht, die Profile 1-1.5 m auszuheben, da die gesuchte Schicht in dieser Tiefe vermutet wurde. Der grosse Steinanteil der Böden im Untersuchungsgebiet erschwerte die Handarbeit jedoch, sodass dieses Ziel nicht überall erreicht werden konnte.

Alle sieben Bodenprofile befinden sich auf der gleichen Talseite, an drei verschiedenen Orten (Abb. 11). Profile 1 und 2 liegen nahe des Dorfes Anzonico, während Profile 3, 4 und 5 unterhalb von Singiasco ausgehoben wurden. Die letzten beiden Bodenprofile (6 und 7) liegen etwas weiter nordwestlich unterhalb von Suaggia. Die Profilstandorte liegen in steilem, teils schlecht zugänglichem Gelände zwischen 1043 und 1515 m ü. M., sind südexponiert und befinden sich mehrheitlich auf öffentlichem Grund im Wald bzw. in Waldlichtungen. Lediglich Profil 1 wurde auf einem privaten Grundstück, mit Bewilligung des entsprechenden Besitzers, ausgehoben.

Pro Profil wurde meist aus jedem zu erkennenden Bodenhorizont eine Erdprobe genommen. Bei allfälligem Vorkommen von organischem Material (Bsp. Kohlepartikel) wurden entsprechend einzelne Partikel zusätzlich für die Untersuchungen bzw. Datierung im Labor gesammelt.

Als Ergänzung dazu und um einen Überblick über das Untersuchungsgebiet zu erhalten, wurden mögliche Anrissstellen von Rutschungen auf einer topographischen Karte 1:10'000 (Digitale Landeskarte 1:10'000, swisstopo, Datenstand: 2016) kartiert. Das Höhenmodell SwissALTI3D (swisstopo, Datenstand: 2017) sowie Luftaufnahmen (Luftbilder der Schweiz, swisstopo) waren hilfreich beim Erkennen von Unregelmässigkeiten im Gebiet. Abrundend wurde die komplette Feldarbeit fotografisch dokumentiert und entscheidende Standorte (z.B. Standorte der Profile und Anrissstellen) anhand eines GPS festgehalten (Abb. 11).

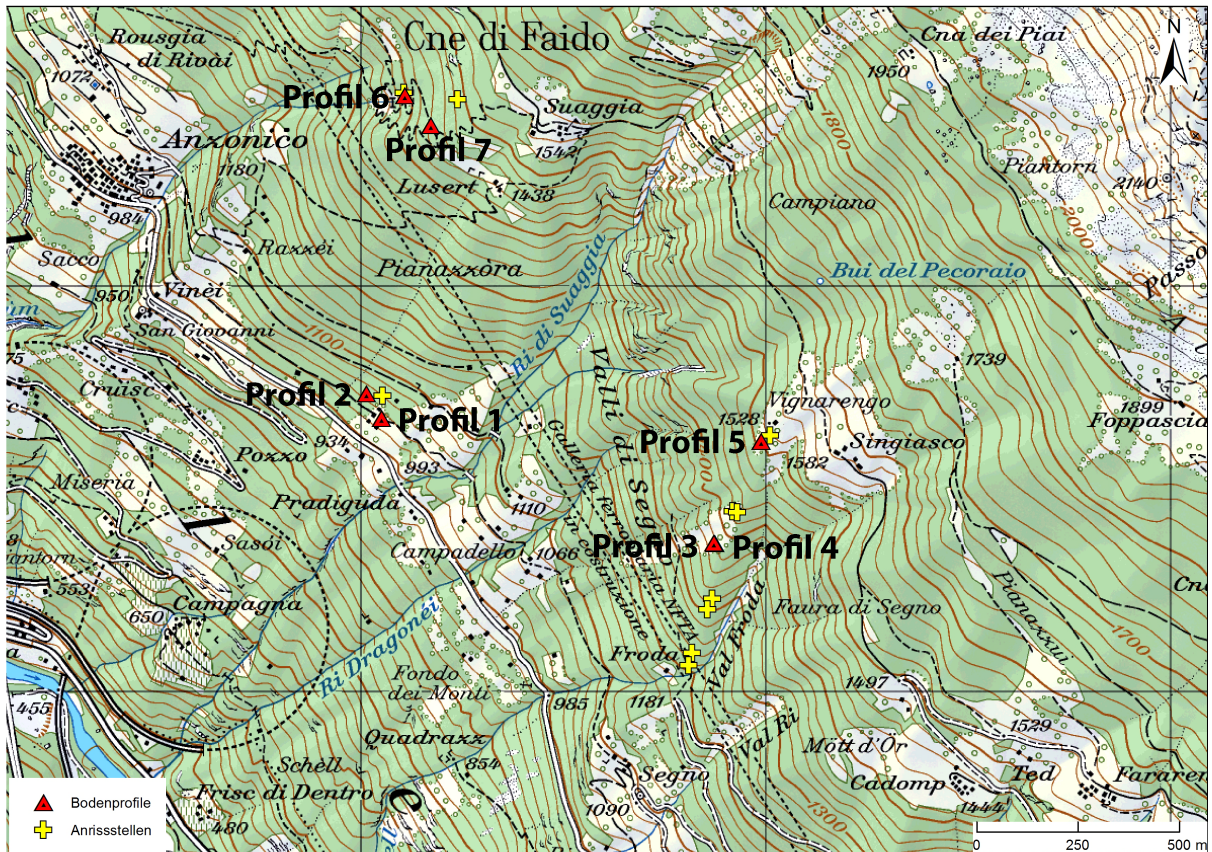


Abb. 11: Übersicht über die Profilstandorte, inkl. kartierter Anrissstellen.

Profile 3 und 4 liegen nur wenige Meter auseinander, weshalb an dieser Stelle nur ein Markierungssymbol auf der Karte erkennbar ist (Digitale Landeskarte 1:25'000, swisstopo, Datenstand: 2008, ergänzte Darstellung).

Wie die Neigungsangaben in Tab. 2 zeigen, ist das ganze Untersuchungsgebiet steil. Fast alle Standorte, mit Ausnahme von Profil 1, weisen eine Hangneigung von über 30°, drei davon sogar zwischen 35° und 40° auf.

Tab. 2: Geographische Koordinaten der Bodenprofilstandorte.

Profil	Höhe (m ü. M.)	Koordinaten (CH1903)	Hangneigung (°)
1	1043	710050, 142674	<30
2	1045	710013, 142735	30-35
3	1380	710874, 142365	35-40
4	1375	710871, 142367	35-40
5	1515	710988, 142617	30-35
6	1412	710108, 143470	35-40
7	1446	710172, 143397	30-35

3.3 Probenaufbereitung

Das gesammelte Material wurde grösstenteils in den Labors des geographischen Instituts an der Universität Irchel in Zürich analysiert.

Vor Beginn der eigentlichen Laboranalyse wurden die Bodenproben während zweier Tage im Heissluftofen bei 40°C getrocknet. Danach folgte die Bestimmung des Gesamtgewichtes jeder einzelnen Probe sowie deren Fraktionierung in zwei Teile – Feinerde (Korndurchmesser < 2 mm) und Bodenskelett (Korndurchmesser ≥ 2 mm) – wofür ein Sieb mit Netzweite 2 mm verwendet wurde. Durch erneutes Abwägen der beiden Teile wurde der prozentuale Skelettanteil jeder Probe berechnet.

Beim Auffinden einzelner Holzkohlepartikel im Skelettmaterial, wurden diese von Hand herausgelesen und separat für die ¹⁴C-Altersbestimmung aufbewahrt.

Für die C/N-Elementaranalyse sowie für die Röntgenfluoreszenzanalyse wurden jeweils 10 g der Proben während sieben Minuten in der Schwingmühle durch zwei Kugeln Wolframcarbit fein gemahlen und homogenisiert.

3.4 Physikalische Analysen

3.4.1 Bestimmung des Skelettgehaltes

Die Bestimmung des Skelettgehaltes eines Bodens ist hilfreich bei dessen Klassifikation. Weiter können Erkenntnisse zum physikalischen Verwitterungsgrad des Muttergesteins gewonnen werden (Brunner et al. 2002). Im Feld wurde pro Horizont eine Erdprobe von 300-1000 g entnommen. Das anschliessende Sieben der Proben mit dem 2 mm Sieb und das darauffolgenden Abwägen der beiden Teile (Feinerde und Bodenskelett) ergab den exakten prozentualen Skelettgehalt pro Bodenhorizont. Im Gegensatz zur Feinerde wurde das Bodenskelett nicht weiter untersucht.

3.4.2 Bestimmung der Bodenfarbe

Die Bestimmung der Bodenfarbe der einzelnen Horizonte dient der allgemeinen Klassifikation von Böden. Die verschiedenen Farbtöne widerspiegeln häufig spezifische Zustände. Deshalb gilt die Farbbeschreibung als wichtiger Teil der bodenkundlichen Feldaufnahme (Scheffer und Schachtschabel 2010; Schaetzl und Anderson 2005). Sie erfolgt im feuchten Zustand mithilfe der sog. Munsell-Farbtabelle. Die Untersuchung der Farbe kann sowohl direkt im Feld, als auch während der anschliessenden Laboranalysen durchgeführt werden (Brunner et al. 2002). In vorliegender Arbeit wurde die Farbe durch das Befeuchten der Proben im Labor bestimmt. Folgende drei Komponenten gelten nach Scheffer und Schachtschabel (2010) und Brunner et al. (2002) als Bestandteile der Bodenfarbe:

- *Farbton (Englisch: Hue)*: Unterscheidung von roten, braunen und grauen Böden.
- *Grauwert (Englisch: Value)*: Liefert Hinweise über den Gehalt sowie die Humifizierung der organischen Substanz einer Probe. Kategorisiert wird wie folgt:
 - Hellgrau (Englisch: Grauwert 7-8) → humusarm
 - Grau (Grauwerte 5-6) → schwach humos
 - Dunkelgrau (Grauwert 3-4) → humos
 - Schwarzgrau (Grauwert 1.5-2) → humusreich
 - Dunkelbraun-schwarz, faserig → Humus
- *Farbintensität (Englisch: Chroma)*: Hängt mit der Konzentration, dem Dispersitätsgrad und der Art des Farbstoffes zusammen.

Entsprechend wird die Bodenfarbe in abgekürzter Form wie folgt angegeben: **H V/C** (Bsp. 10YR 4/6).

3.5 Chemische Analysen

3.5.1 pH

Der pH charakterisiert den Säuregehalt einer Bodenlösung und gibt Auskunft über den allgemeinen Zustand des Bodens. Die Messung erfolgte mit einem pH-Meter. Dafür wurde eine pH-Mess-Elektrode zu Kalibrationszwecken in zwei standardisierte Lösungen (pH 7 und pH 4) und anschliessend in die vorbereitete Bodenlösung, bestehend aus exakt 10 g ungemahlener Erde und 25 ml Kalziumchloridlösung (CaCl_2) (0.01 mol/l), eingetaucht. Wichtig dabei war das Verhältnis von 1:2.5 zwischen Bodenprobe und Bodenlösung. Das Gemisch wurde während 30 Minuten mit Magnetstäbchen umgerührt und danach ebenso lange stehen gelassen. Anschliessend wurde die Elektrode in die entstandene Suspension getaucht und der entsprechende pH-Wert nach dessen Stabilisierung abgelesen (Brunner et al. 2002; Egli et al. 2016).

3.5.2 C/N-Elementaranalyse

Die C, (H), N-Elementaranalyse ist eine absolute Bestimmungsmethode. Bei diesem Verfahren werden durch Verbrennung der homogenen organischen Bodenprobe verschiedene Elemente aus dem Material gelöst. Der Gehalt an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) der Probe wird gemessen. So kann der Anteil des N an der organischen Substanz angegeben werden, indem der totale organische C-Gehalt (C_{org}) und der totale N-Gehalt (N_{tot}) in ein Verhältnis, das sogenannte C/N-Verhältnis, gesetzt werden (Egli et al. 2016; Stahr et al. 2012).

Aus logistischen Gründen wurde die C/N-Elementaranalyse an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Wädenswil durchgeführt. Für die Messung mit dem TrueSpec CHN Macro Analyser wurden 0.01 g von jeder Probe abgewogen und von Hand tropfenförmig in eine Zinnfolie verpackt.

3.5.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)

Die XRF-Methode ermöglicht eine Materialanalyse sowie die Messung der vom Material emittierten Strahlung (fluoreszierende Strahlung), woraus Informationen über die elementare Zusammensetzung des Materials gewonnen werden können (Hahn-Weinheimer et al. 1995).

Die Bestimmung der Materialzusammensetzung erfolgt zerstörungsfrei. Die Elemente werden durch die Bestrahlung mit Röntgenstrahlen (X-Strahlen) angeregt, wodurch kernnahe Elektronen aus den inneren Atomschalen herausgeschlagen werden und eine Lücke hinterlassen. Diese wird mit einem Elektron aus einer äusseren Schale besetzt, was ein Transfer eines Elektrons von einer höheren in eine tiefere energetische Schale zur Folge hat (Abb. 12). Bei diesem Vorgang wird Energie in Form von Photonen freigesetzt. Diese Fluoreszenzstrahlung ist elementarspezifisch und wird von einem Detektor gemessen (Fischer 2017; Shackley 2011)

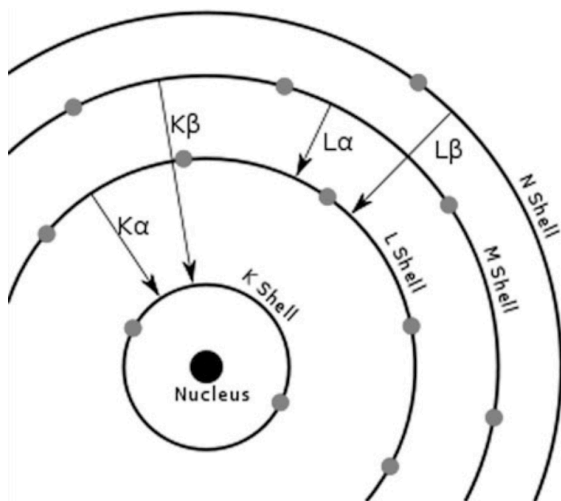


Abb. 12: Schematische Darstellung des Prinzips der Röntgenfluoreszenzanalyse.

Durch das Anregen wird ein Elektron aus der K-Schale herausgelöst, was eine Lücke hinterlässt. Diese wird mit einem Elektron aus der L- oder M-Schale gefüllt. Folge davon ist die Entstehung der für jedes Element spezifischen $K\alpha$ - und $K\beta$ -Strahlung (Shackley 2011).

Für die Analyse wurden spezielle Plastikcups vorbereitet, deren Boden aus einer dünnen Folie (SpectroMembrane der Marke Chemplex) präzise von Hand angefertigt wurde. Anschliessend wurden die Cups mit exakt 5 g von jeder Probe gefüllt und mit einem Deckel verschlossen.

Vor Beginn der eigentlichen Messung wurde eine Kalibrierung mit bekannten Standardwerten durchgeführt. Danach wurde während 4 ½ Stunden mit dem sogenannten Spectro Xepos (Marke Ametek Materials Analysis Division) gemessen. In der Software X-Lab Pro wurden die erhaltenen Daten gespeichert. Die Genauigkeit der Messung liegt bei $\pm 10\%$.

3.5.4 Radiokarbondatierung (^{14}C -Altersbestimmung)

Holzkohle

Werden Holzkohlepartikel im Boden gefunden, kann deren Alter numerisch mittels Radiokarbondatierung bestimmt werden. Zu Säuberungszwecken werden die Proben zuerst mit der AAA-Methode (acid-alkali-acid) aufbereitet, wobei spezifische Kohlenstofffraktionen entfernt oder abgesondert werden (Hajdas 2008; McGeehin et al. 2001). In einem ersten Schritt wird das Material in einer Säurelösung gereinigt, um eine Karbonatkontamination durch die Oberfläche zu verhindern. Die anschliessende Behandlung der Proben mit einer schwachen Base (z.B. 0.1 M NaOH) dient zur Lösung von Huminsäuren. Für den dritten und letzten Schritt der Säuberung wird eine Alkalilösung verwendet, die wiederum dazu verhilft, Karbonate zu lösen (Hajdas 2008).

Da im Untersuchungsgebiet nur sehr kleine Holzkohlepartikel im Boden gefunden wurden, erfolgte die nachfolgende eigentliche ^{14}C -Bestimmung mit der sogenannten Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Technik, welche eine Datierung von Partikeln mit einem Gewicht von weniger als 1 mg ermöglicht (Carcaillet 2001) und einen Altersbereich von ca. 40'000-50'000 Jahren abdeckt. Bei dieser Methode wird die Konzentration des ^{14}C -, ^{13}C - sowie des ^{12}C -Isotops bzw. deren Verhältnis in den organischen Fragmenten gemessen (Carcaillet 2001; Hajdas 2008).

Die Vorbereitung der Proben erfolgte im Radiokarbonlabor des Geographischen Instituts der Universität Zürich. Die Datierung mit der AMS Methode erfolgte im Laboratorium für Ionenstrahl-Physik an der ETH Höggerberg mit einem hochpräzisen Massenspektrometer.

POM-Fraktionierung

Die POM-Fraktionierung (Particulate Organic Matter) ist eine von mehreren Probeaufbereitungsmethoden für die ^{14}C -Datierung von Bodenmaterial. Die jüngste Fraktion des C_{org} (POM) einer Bodenprobe wird durch einen chemischen oder akustischen Trennvorgang mit anschliessendem Sieben extrahiert (Mirsky et al. 2008) und zur Abschätzung von labilem SOM (Soil Organic Matter) verwendet. Im Detail handelt es sich bei POM um organisches Bodenmaterial mit einer Partikelgrösse von 0.050-2 mm, bestehend aus unzersetzten Pflanzenresten mit erkennbaren Zellstrukturen, Pilzhyphen, Samen, Sporen und tierischen Skeletten (Gregorich und Janzen 1996). Anschliessend an die Aufbereitung kann das Material mithilfe der ^{14}C -Datierung datiert werden.

In vorliegender Arbeit wurden ca. 25 g Feinerde mit 100 ml einer Natrium-Hexametaphosphat-Lösung (5 g/L $(\text{NaPO}_3)_6$) gemischt und während 18 Stunden in einem Horizontalschüttler geschüttelt, um allfällige Bodenaggregate zu zerstören. Dann folgte das Sieben mit einem 63 μm Sieb, bis nur noch die Partikel der POM-Fraktion im Sieb zurückblieben. Letztere wurden getrocknet und mit der ^{14}C -Datierung datiert.

H₂O₂-Fraktionierung (Wasserstoffperoxid)

Auch die H₂O₂-Fraktionierung dient zur Aufbereitung der Bodenproben für die Radiokarbondatierung. Sie beruht auf der Annahme, dass der partielle oxidative Abbau von organischem Material resistentes organisches Material hinterlässt. Beim Prozess der Fraktionierung mit H₂O₂ wird die stabile Fraktion des organischen Materials der Probe bzw. die älteste Fraktion des C_{org} extrahiert. Das Ganze basiert auf der Oxidation von organischem Material mit 10% H₂O₂ (Eusterhues et al. 2003; Plante et al. 2004). Diese Art von Fraktionierung ermöglicht die Bestimmung des ungefähren Beginns der Bodenbildung.

Kalibration des Alters

Die Ergebnisse der Datierungen resultierten als unkalibrierte ¹⁴C-Alter (uncal BP). Mithilfe des Programms OxCal 4.2 (Bronk Ramsey und Sharen Lee 2013) wurden sie in kalibrierte Alter (cal BP), d.h. Kalenderjahre vor 1950 umgerechnet. Verschiedene Faktoren machen eine solche Kalibration unabdingbar. Neben der falsch angenommenen Libby-Halbwertszeit von 5568 Jahren führten in der Vergangenheit insbesondere grössere Schwankungen des atmosphärischen ¹⁴C-Gehaltes dazu, dass das konventionelle ¹⁴C-Alter nicht dem tatsächlichen Kalenderalter entspricht (Freund 2008; Hajdas 2008). Natürliche Ursachen wie die Klimavariabilität (z.B. durch Eiszeiten) hatten eine Umverteilungen des ¹⁴C innerhalb der verschiedenen Kohlenstoffreservoirs zur Folge, was sich auf das atmosphärische ¹⁴C auswirkte (Siegenthaler und Heimann 1980). Doch auch anthropogene Effekte zeigen einen beträchtlichen Einfluss auf das atmosphärische ¹⁴C. Zu nennen ist beispielsweise die industrielle Revolution des späten 19. Jahrhunderts, die eine verstärkte Verbrennung fossiler Brennstoffe und somit ein verringertes ¹⁴C/¹²C Verhältnis in der Atmosphäre zur Folge hatte (sog. Süss-Effekt) (Hajdas 2008). Als weiterer bedeutender Faktor gilt die Durchführung von Atomwaffentests ab Mitte des 20. Jahrhunderts in verschiedenen Teilen der Welt. Sie führten zu einer stark erhöhten Produktion von ¹⁴C-Atomen in der Atmosphäre. Der ¹⁴C-Gehalt wurde zur genannten Zeit fast verdoppelt (Hajdas 2008).

Diese und weitere Effekte sind mitverantwortlich für die entstandene Variabilität des atmosphärischen ¹⁴C-Gehaltes und verlangen die erwähnte Kalibration. Als Basis dafür wurde die IntCal 13 Kalibrationskurve (Reimer et al. 2013) verwendet. Das entsprechende Alter wurde mit einem 95%-Konfidenzintervall (2σ) angegeben.

3.6 Digitalisierung in ArcMap

Vergangene Ereignisse und bestehende Schutzbauten

Um einen allgemeinen Überblick über die Hangaktivität und -dynamik im Untersuchungsgebiet zu erhalten, wurden vergangene Naturereignisse sowie errichtete Schutzbauten digitalisiert. Als Basiskarte diente eine topographische Karte im Massstab 1:25'000 (Digitale Landeskarte 1:25'000, swisstopo, Datenstand: 2008), die vom Geographischen Institut der Universität Zürich zur Verfügung gestellt wurde. Die zu digitalisierenden Daten wurden vom *Dipartimento del Territorio* in Bellinzona und vom *Ufficio forestale del 2° circondario* in Biasca erhoben. Bis jetzt wurde erst ein kleiner Teil des Untersuchungsgebietes digitalisiert, d.h. lediglich wenige Ereignisse der vergangenen Jahre. Somit wurde der grösste Teil der Informationen nur in Form von Berichten und Papierkarten erfasst. Eine Digitalisierung der Daten stösst auch seitens des Kantons Tessin auf Interesse.

Es ist zu bemerken, dass die im Rahmen vorliegender Arbeit digitalisierte Karte, einen Grossteil der vergangenen Naturereignisse und Schutzbauten enthält. Aufgrund mangelnder Qualität (z.B. von Hand gezeichnete Karten) konnten aber nicht alle Daten verwendet werden. Teilweise fehlen exakte Koordinaten, wodurch die entsprechenden Symbole leicht von der Realität abweichen können. Für einige Ereignisse (Bsp. Lawinnenniedergang) konnte nicht die ganze Fläche als Polygon erfasst werden. Diese Geschehnisse wurden nur mit einem Punktsymbol markiert. Hierbei ist in manchen Fällen die Abrissstelle des Ereignisses bekannt bzw. in der Karte gekennzeichnet, in anderen Fällen ist nur der Endpunkt bzw. der Ablagerungsort markiert. Einige Geschehnisse wurden sowohl punktuell als auch flächenhaft erfasst. Um Fehler und Lücken zu vermeiden, wurden trotzdem beide Varianten digitalisiert. Zudem ist bekannt, dass es bereits viele Jahre vor 1951 immer wieder Ereignisse gab, die nicht zuverlässig dokumentiert wurden. Folglich wurden nur die registrierten Geschehnisse seit 1951 eingezeichnet und behandelt.

Folgende vier Ereignistypen wurden digitalisiert:

- *Steinschlag (Italienisch: caduta sassi)*: Umfasst alle Ereignisse, die mit Gestein/Fels zu tun haben. Beispielsweise Steinschlag, Felssturz etc. (Dipartimento del Territorio, o.J.).
- *Erdrutsche (Italienisch: scivolamenti)*: Beinhaltet alle Rutschungen von gelöstem Material. z.B. oberflächliche oder tiefgründige Erdrutsche (Dipartimento del Territorio, o.J.).
- *Hangmuren (Italienisch: colate detritiche)*: Umfasst alle Phänomene, bei denen die Komponente Wasser im Spiel ist. Beispielsweise Murgänge, Überschwemmungen (Dipartimento del Territorio, o.J.).
- *Lawinen (Italienisch: valanghe)*: Beinhaltet alle Staublawinen (Dipartimento del Territorio, o.J.).

Folgende Typen von Verbauungen wurden digitalisiert:

- *Bremskörper*
- *Windschutz*
- *Mauern*
- *Lawinenverbauungen und Netze*
- *Dämme*

Wasserfassungen

Ergänzend zu den vergangenen Naturereignissen und Verbauungen wurden alle vorhandenen Grundwasserfassungen (Quellen, Brunnen, Sondierungen) digitalisiert. Dies soll Hinweise über den Grundwasserfluss bzw. das Wasserverhalten im Gebiet liefern, was möglicherweise Gründe für die elementare Zusammensetzung der Bodenhorizonte aufdecken kann. Die entsprechenden Daten mit exakten Koordinaten wurden vom *Istituto Scienze della Terra* der *Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI)* in Canobbio zur Verfügung gestellt. Weitere Informationen zu bestehenden Grundwasserschutzzonen konnten dem BAFU (Grundwasserschutzzonen, BAFU, Datenstand: 2013) entnommen werden.

4 Resultate

4.1 Feldarbeit

Folgende übergeordnete Bodentypen mit Horizontbezeichnungen nach dem WRB-System (World Reference Base for Soil Resources) wurden bei den sieben Profilen festgestellt, wobei beim Podsol nicht die komplett entwickelte Form, sondern viel mehr eine beginnende Podsolierung vorgefunden wurde:

- *Cambisol*: Weist einen humosen Ah-Horizont auf, der in einen gut entwickelten, verbraunten und verlehnten Bw-Horizont übergeht, gefolgt von einem C-Horizont. Der Bw-Horizont entsteht durch die Verwitterung von Silikaten und der damit verbundenen Bildung von sekundären Mineralen. Abhängig vom Ausgangsgestein wird zwischen basenreichen und basenarmen (sauren) Cambisolen unterschieden. Generell gilt der Cambisol als weit verbreiteter Bodentyp in Mitteleuropa und den Alpen, wobei der basenarme Typ deutlich häufiger vorkommt (Scheffer und Schachtschabel 2010; IUSS Working Group WRB 2007), so auch im Untersuchungsgebiet. Es wurden mehrere Cambisole festgestellt (siehe Kap. 4.1.1-4.1.3 und 4.1.7).
- *Podsol*: Stark saure Böden mit einem ausgebleichten Ae-Horizont und einem darunterliegenden mit Fe/Al-Hydroxiden angereicherten Bs- und/oder Bh-Horizont. Der Prozess der Ausbleichung bzw. Anreicherung von Hydroxiden wird in der Fachsprache Podsolierung genannt. Podsole entstehen hauptsächlich auf sandigen, quarzreichen und sauren Ausgangsgesteinen (wie z.B. Gneis im untersuchten Gebiet), bei hohen Niederschlägen sowie schwer abbaubarer Streu. Die Verwitterungs- und Verlagerungsvorgänge in Podsolen finden ihr grösstes Ausmass in kalt- bis gemässigt-humiden Klimata (Scheffer und Schachtschabel 2010; IUSS Working Group WRB 2007). Im Untersuchungsgebiet wurde ein beginnender Podsol wahrgenommen (siehe Kap. 4.1.5).
- *Regosol*: Bei diesem Bodentyp ist ein humoser Ah-Horizont über einem silikatischen, lockeren und kalkfreien Ausgangsgestein (wie z.B. Gneis im Untersuchten Gebiet) zu beobachten. Regosole können flach- oder tiefgründig sein, sind meist jedoch weniger entwickelt als Cambisole (IUSS Working Group WRB 2007). Sie weisen eine sandige Körnung auf, sind sauer und haben einen organischen Auflagehorizont. In Mitteleuropa sind sie nur kleinflächig vorzufinden, hauptsächlich auf erodierten Landoberflächen (Scheffer und Schachtschabel 2010; IUSS Working Group WRB 2007). An einem Standort im Untersuchungsgebiet wird ein Braunerde-Regosol, der einen verbraunten Saum (Bw-Horizont) zeigt, vermutet (siehe Kap.4.1.4).

4.1.1 Profil 1

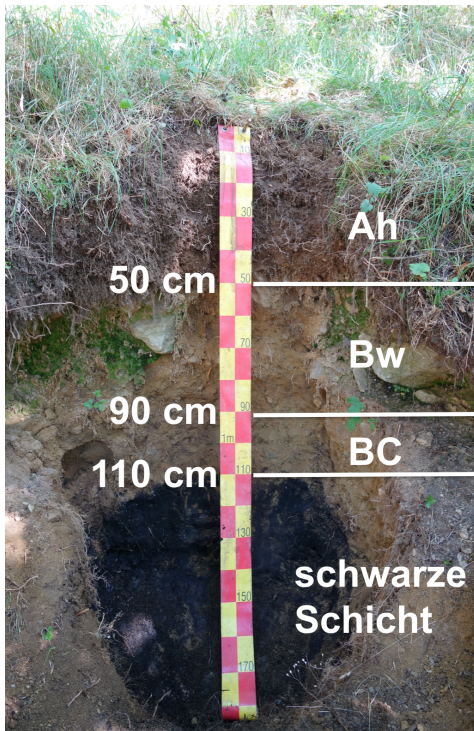


Abb. 13: Bodenprofil 1.

Bodenprofil 1 befindet sich in Pradiguda, ca. 1 km südöstlich des Dorfes Anzonico auf einem privaten Grundstück. Die Stelle liegt unweit des Waldes. Die Horizontabfolge in Abb. 13 lässt auf einen Cambisol schliessen (Scheffer und Schachtschabel 2010). Obwohl der Horizont unterhalb von 110 cm nicht deklariert werden konnte, wurde der Boden aufgrund der feuchten, schmierigen Konsistenz und der auffallend dunklen Färbung der schwarzen Schicht als Gleyic Cambisol (IUSS Working Group WRB 2015) benannt. Nach Angaben des Försters soll es sich beim dunklen Horizont um die genannte „mysteriöse“ schwarze Schicht handeln.

4.1.2 Profil 2

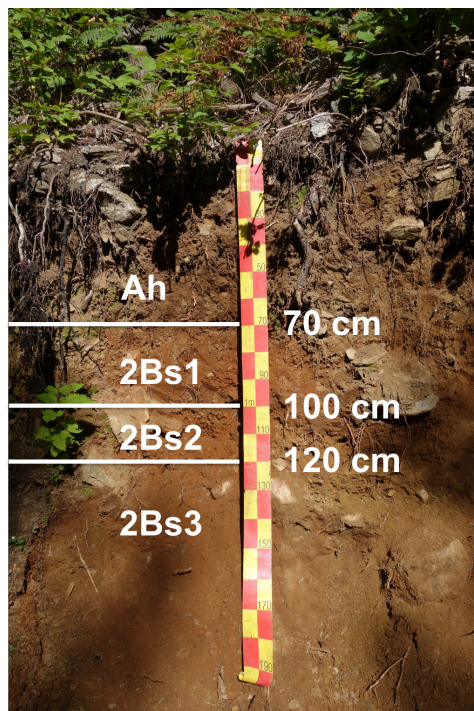


Abb. 14: Bodenprofil 2.

Profil 2 befindet sich ca. 20 m von Profil 1 entfernt. Es liegt direkt am Waldrand an einem Fahrweg. Die Abfolge der Bodenhorizonte ist bei diesem Profil nicht eindeutig abgrenzbar (Abb. 14). Es sieht nach zwei voneinander unabhängigen Schichten bzw. einer Durchmischung der Schichten aus. Die einzelnen Horizonte scheinen mehrmals, in unterschiedlichen Tiefen vorzukommen. Aufgrund der auffallend rötlichen Farbe wurden drei mögliche Horizonte als Bs-Horizonte deklariert, die durch die Einwaschung mit Sesquioxiden (v.a. Fe) angereichert sind (Scheffer und Schachtschabel 2010; Stahr et al. 2012). Würde man den Boden genauer benennen, so könnte es sich um einen Ferralic oder Chronic Cambisol handeln.

4.1.3 Profil 3

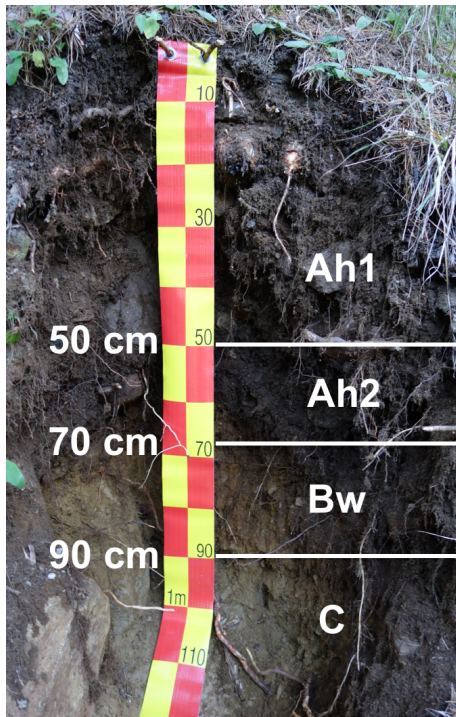


Abb. 15: Bodenprofil 3.

Bodenprofil 3 (Abb. 15) wurde unterhalb des Standortes Singiasco in einer Waldschneise mit Rutschungsverbauungen (Mauern) ausgehoben. Die Schneise ist mit einer Mischung von jungem Laub- und Nadelgehölze überwachsen. Hier sind zwei verschiedene Ah-Horizonte zu beobachten, wobei der Ah2-Horizont farblich gesehen Ähnlichkeiten mit der schwarzen Schicht aus Profil 1 hat. Die übrige Horizontabfolge lässt wiederum auf einen Cambisol schliessen (Scheffer und Schachtschabel 2010).

4.1.4 Profil 4

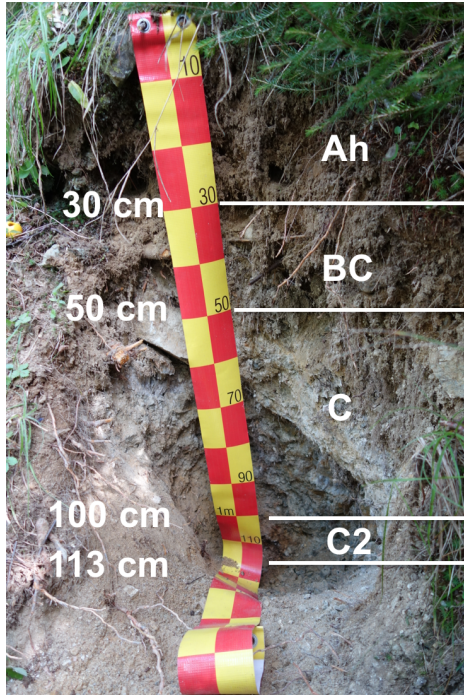


Abb. 16: Bodenprofil 4.

Das vierte Bodenprofil liegt 2 m rechts von Profil 3. Die Horizontabfolge sieht hier jedoch etwas anders aus (Abb. 16). Da kein eindeutiger B-Horizont, sondern eher ein Übergang in den C-Horizont erkennbar ist, handelt es sich möglicherweise um einen Braunerde-Regosol (Scheffer und Schachtschabel 2010; Brunner et al. 2002). Der Horizont, der als C2 deklariert wurde, ist wesentlich schmaler und etwas dunkler gefärbt als der C-Horizont. Es stellt sich die Frage, ob dieser ebenfalls mit der schwarzen Schicht in Verbindung steht. Bei diesem Profil wurden nur zwei Proben genommen (Ah und C2).

4.1.5 Profil 5

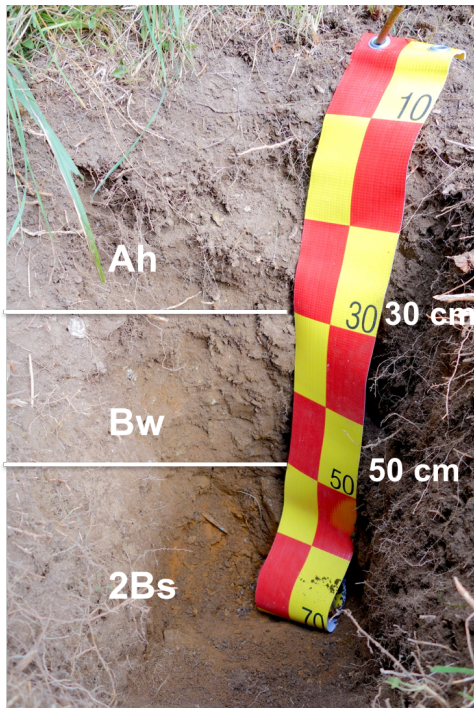


Abb. 17: Bodenprofil 5.

Profil 5 (Abb. 17) liegt etwa 250 m (Luftlinie) nördlich der Profile 3 und 4, wenige Meter unterhalb einer Jagdhütte. Die vorliegende Horizontabfolge ist nicht eindeutig einem Bodentypen zuzuordnen. Möglicherweise handelt es sich um einen einstigen Podsol, dessen E-Horizont erodiert und anschliessend mit neuem Material (Ah-Horizont) überlagert wurde. Der 2Bs-Horizont könnte jedenfalls auf eine beginnende Podsolierung hindeuten (Scheffer und Schachtschabel 2010; Stahr et al. 2012).

4.1.6 Profil 6

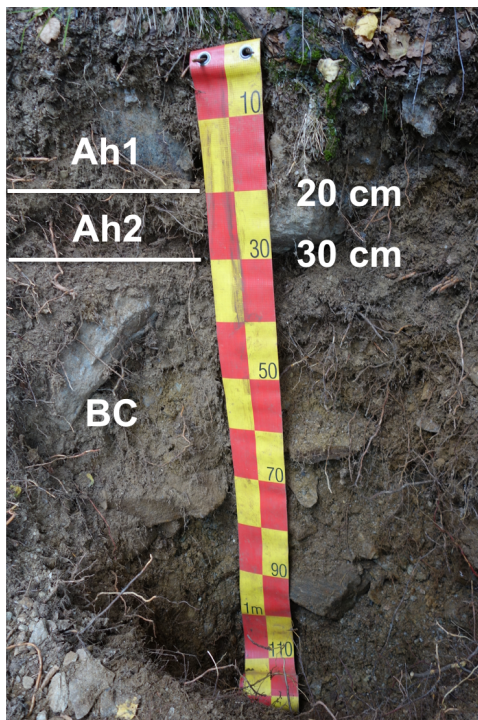


Abb. 18: Bodenprofil 6.

Profil 6 (Abb. 18) wurde ca. 400 m westlich (Luftlinie) und leicht unterhalb von Suaggia ausgehoben. In diesem Profil lässt sich keine klare Horizontabfolge ablesen. Die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Horizonten sind nicht eindeutig erkennbar. Dennoch wurde versucht, eine Abfolge zu definieren: Ah1 – Ah2 – BC. In diesem Fall wurde lediglich eine Probe des Ah2-Horizonts genommen. Grund dafür ist die vermutete Ähnlichkeit zur schwarzen Schicht in Bodenprofil 1. Die anderen beiden Horizonte wurden als zu wenig aussagekräftig deklariert.

4.1.7 Profil 7

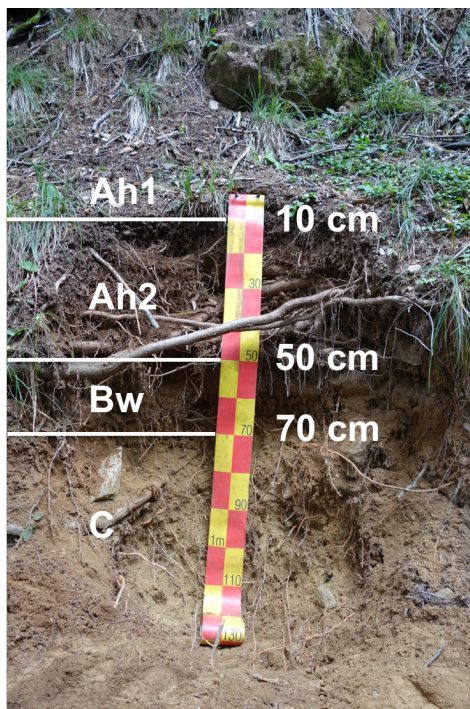


Abb. 19: Bodenprofil 7.

Bodenprofil 7 (Abb. 19) liegt etwa 100 m (Luftlinie) südöstlich von Profil 6. Seine Horizontabfolge Ah1– Ah2 – Bw – C deutet auf einen klassischen Cambisol hin (Scheffer und Schachtschabel 2010). Da dieses Profil mit Sicherheit keine schwarze Schicht aufweist, dient es als Standardprofil. So können Vergleiche mit den übrigen Bodenprofilen gemacht werden.

4.1.8 Einordnung der untersuchten Böden

Ein Abgleich der vermuteten Abrissfläche des Bergsturzes von Chironico (Abb. 5) mit den Bodenprofilstandorten zeigt, dass sich die Profile 1, 2, 6 und 7 innerhalb dieser Zone befinden. Profile 3, 4 und 5 liegen ausserhalb.

Optische Vergleiche mit dem Cambisol des Standardprofils 7 zeigen, dass die Profile 1, 3 und 4 je einen etwas dunkleren Horizont haben. Fühlt man deren Konsistenz wird jedoch klar, dass die schwarze Schicht in Profil 1 in einer Tiefe von ca. 110-180 cm dunkler, feiner und schmieriger ist als der Ah2 Horizont in Profil 3 bzw. der C2 Horizont in Profil 4. Letzterer ist ausserdem verhältnismässig schmal. Die restlichen Horizonte zeigen optisch keine Ähnlichkeiten mit der genannten Schicht. Profile 2 und 5 weichen am stärksten von den übrigen Profilen ab. Bei Ersterem erschwert die erkennbare Durchmischung verschiedener Horizonte und Schichten eine klare Einteilung in einzelne Horizonte, während bei Letzterem der mögliche Beginn einer Podsolierung Unsicherheit bei der genauen Benennung des Bodentyps bringt.

4.1.9 Kartierung von Anrissstellen

Die Kartierung von möglichen Anrissstellen im Gebiet (Abb. 11 und 20) zeigt, dass das Gelände rund um die Profile instabil ist. Aufgrund der grossen Steilheit der ganzen Region, sind viele Orte sehr schlecht bis gar nicht zugänglich. So konnten verhältnismässig wenige Stellen kartiert werden. Luftaufnahmen, Satellitenbilder und Fotos (Abb. 20-22) zeigen, dass das Gebiet insbesondere an den unzugänglichen Stellen ebenfalls viele Waldschneisen und Unregelmässigkeiten aufweist. Ausserdem deuten Regionen mit einer grösseren Anhäufung von jungen Bäumen auf wiederholte Lawinenniedergänge hin.



Abb. 20: Drei Beispiele von Anrissstellen im Untersuchungsgebiet.

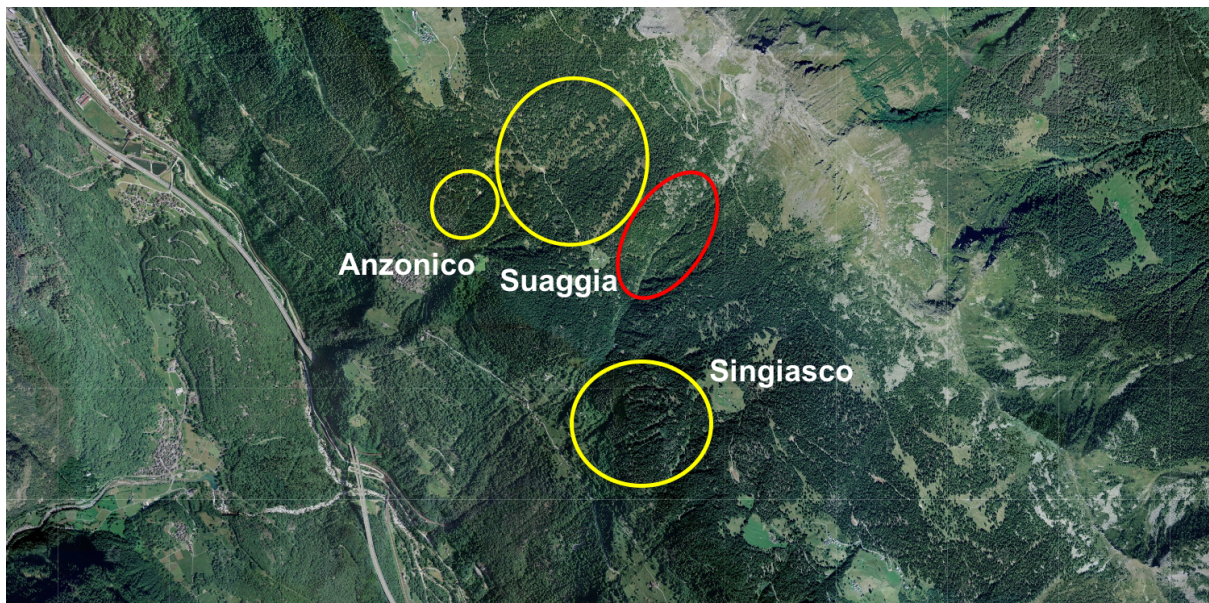


Abb. 21: Luftbild des Untersuchungsgebietes.

Durch Bewegungsprozesse entstandene Waldschneisen sind gelb eingekreist. Der rote Kreis stellt eine, durch Lawinnenniedergänge geprägte Region dar, welche durch jüngere Bäume gekennzeichnet ist (Google Earth, ergänzte Darstellung).

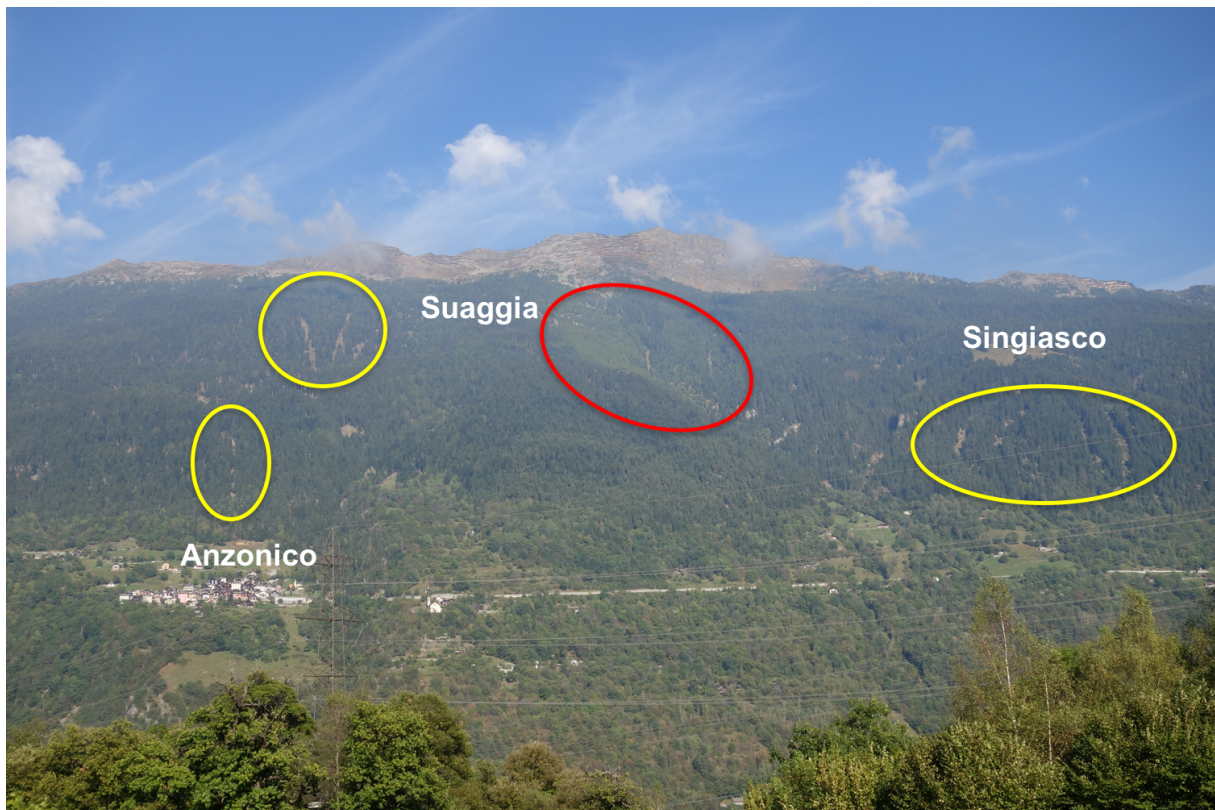


Abb. 22: Foto des Untersuchungsgebietes.

Blick von Chironico aus (gegenüberliegende Talseite). Durch Bewegungsprozesse entstandene Waldschneisen sind gelb eingekreist. Der rote Kreis stellt eine, von Lawinnenniedergängen geprägte Region dar, die von jüngeren Bäumen gekennzeichnet ist.

4.2 Physikalische Analysen

Für die, im Nachfolgenden erstellten Tiefenprofile wurde jeweils die mittlere Tiefe pro Bodenhorizont mit dem entsprechenden Symbol markiert.

4.2.1 Skelettgehalt

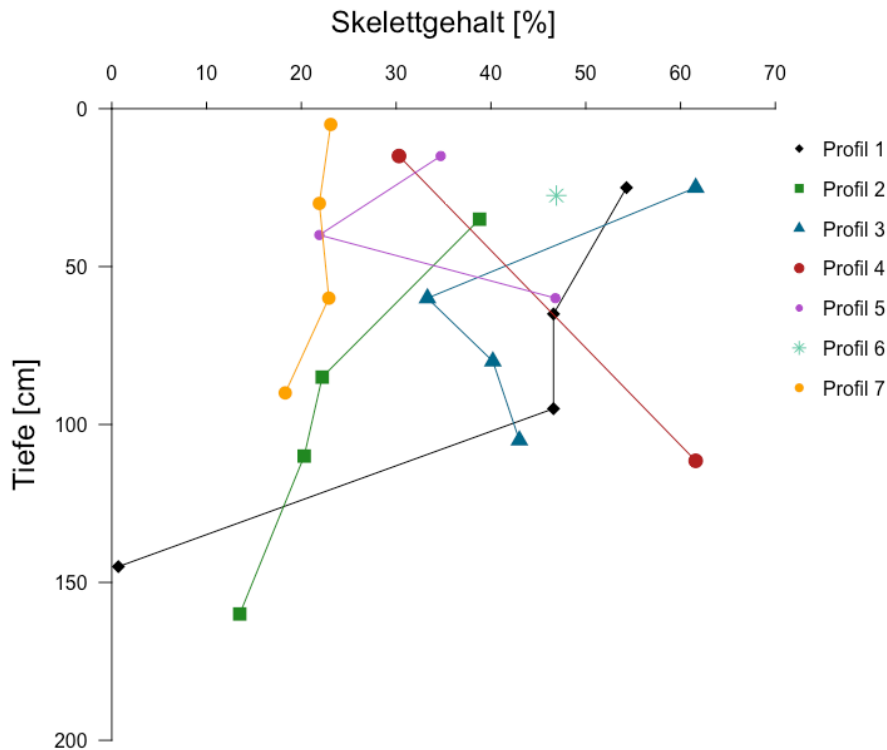


Abb. 23: Skelettgehalt (Material ≥ 2 mm) in % für alle sieben Profile und alle Horizonte.

Beim Sieben mit einer Netzweite von 2 mm wurde die Feinerde vom Bodenskelett getrennt. Wie in Abb. 23 ersichtlich, nimmt der Gehalt an grobem Material bei den meisten Profilen mit zunehmender Tiefe ab, wobei Profil 1 heraussticht. In dessen untersten Horizont (schwarze Schicht), in ca. 1.5 m Tiefe, ist ein extrem geringer Skelettgehalt von lediglich 0.7 % zu verzeichnen. Profile 4 und 5 zeigen als einzige einen, mit der Tiefe zunehmenden Gehalt an Grobmaterial, wobei bei Profil 5 anfänglich eine Abnahme zu erkennen ist.

4.2.2 Bodenfarbe

Die Farbbestimmung der einzelnen Bodenproben im Labor (feuchter Zustand) ist in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Übersicht über die Bodenfarbe der einzelnen Horizonte – Profil 1 bis 7.

Bodenprofil	Horizont	Bodenfarbe (Munsell-Color)
1	Ah	10YR 2/3
	Bw	10YR 4/6
	BC	10YR 4/6
	schwarze Schicht	10YR 2/1
2	Ah	10YR 3/4
	2Bs1	7.5YR 4/6
	2Bs2	7.5YR 4/4
	2Bs3	10YR 4/4
3	Ah1	10YR 2/3
	Ah2	10YR 2/3
	Bw	10YR 4/4
	C	10YR 4/4
4	Ah	10YR 3/4
	C2	10YR 4/6
5	Ah	10YR 2/3
	Bw	10YR 2/3
	2Bs	7.5YR 3/4
6	Ah2	10YR 3/3
7	Ah1	7.5YR 2/2
	Ah2	10YR 3/3
	Bw	10YR 4/4
	C	10YR 4/6

Bei 18 von 24 Bodenhorizonten wurde der Farbton 10YR zugeteilt (Tab. 3), was auf braune Böden hindeutet. Die übrigen 6 Horizonte, welche den Bodenprofilen 2, 5 und 7 angehören, wurden mit 7.5YR als eher rötliche Böden deklariert. Die Sättigungs- und Helligkeitswerte liegen im Allgemeinen zwischen 2 und 6. Der als Hilfe zur Schätzung des Humusgehaltes angegebene Grauwert bewegt sich zwischen 2 und 4, was laut Brunner et al. (2002) auf humose bis humusreiche Horizonte hindeutet.

4.3 Chemische Analysen

4.3.1 pH

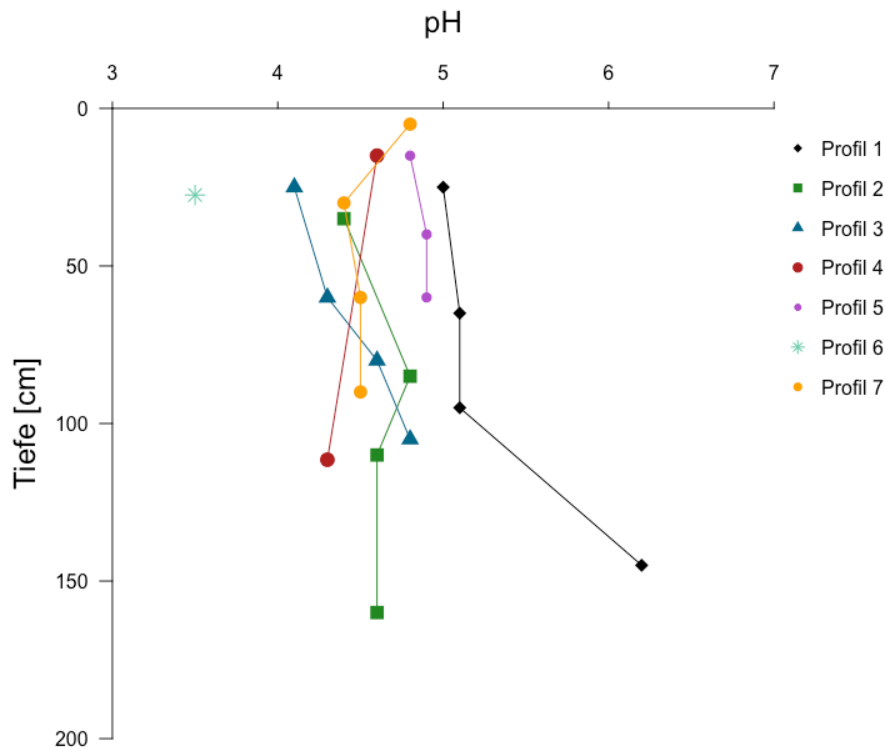


Abb. 24: pH-Werte (gemessen mit CaCl_2) für alle sieben Profile bzw. alle Bodenhorizonte.

Abb. 24 zeigt die gemessenen pH-Werte der einzelnen Bodenhorizonte, wobei pro Horizont eine Messung vorliegt. Sichtbar wird, dass sich die pH-Werte zwischen ca. 3.5 und 6 bewegen und somit im stark bis schwach sauren Bereich (Scheffer und Schachtschabel 2010) liegen. Den tiefsten Wert (3.5) weist Profil 6 in einer Tiefe von ca. 30 cm auf, während bei der schwarzen Schicht in Profil 1 mit Abstand der höchste Wert (6.2) gemessen wurde. Profile 1 und 3 zeigen eine Erhöhung des pH-Wertes mit zunehmender Tiefe. Bei den übrigen Profilen ist weder eine eindeutige Zu-, noch eine klare Abnahme des Wertes von oben nach unten zu erkennen.

4.3.2 Totaler Kohlenstoffgehalt (C_{tot})

Aufgrund der vorherrschenden geologischen Bedingungen (silikatisches Ausgangsmaterial) entspricht der totale Kohlenstoffgehalt C_{tot} dem organischen Kohlenstoffgehalt C_{org} .

Abb. 25 stellt den C_{tot} bzw. C_{org} der sieben Bodenprofile in der Vertikalen dar. Die Werte variieren zwischen 0 und 91 g C pro kg Boden. Alle Profile zeigen erhöhte Werte im oberen Bereich des Bodens, der Of-Horizont in Profil 7 sogar einen stark erhöhten Wert. In einer Tiefe von 60-100 cm ist bei den meisten Bodenprofilen ein Knick in der Verlaufskurve zu beobachten. In den darunterliegenden Horizonten nehmen die einzelnen Kurven einen steilen Verlauf oder führen teilweise zu einer erneuten leichten Zunahme des C-Gehaltes.

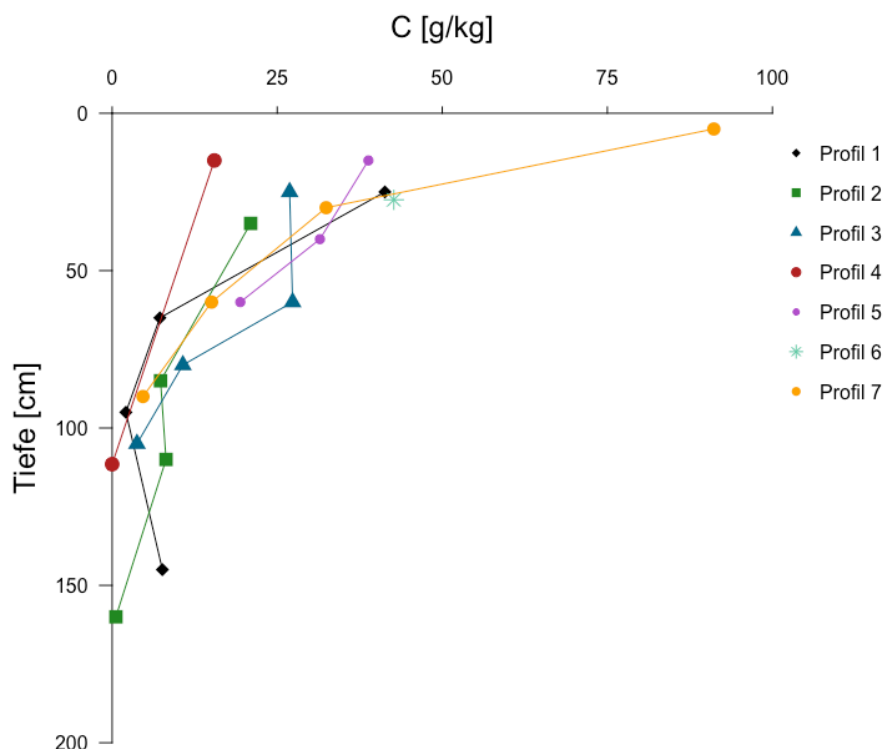


Abb. 25: Totaler C-Gehalt aller Bodenhorizonte der Profile 1 bis 7 in g/kg.

4.3.3 Totaler Stickstoffgehalt (N_{tot})

Abb. 26, die den N-Gehalt in den einzelnen Bodenhorizonten darstellt, zeigt einen ähnlichen Kurvenverlauf wie beim C in Abb. 25. Generell sind die Werte auch hier im Oberboden höher als im Unterboden, sie sind jedoch deutlich tiefer als beim C und liegen im Bereich von 0 bis 5.5 g N pro kg Boden. In Profil 3, in einer Tiefe von ca. 80 cm, wurde ein sehr niedriger Wert von lediglich 0.0063 g/kg gemessen. Das Maximum liegt wiederum im Of-Horizont von Profil 7.

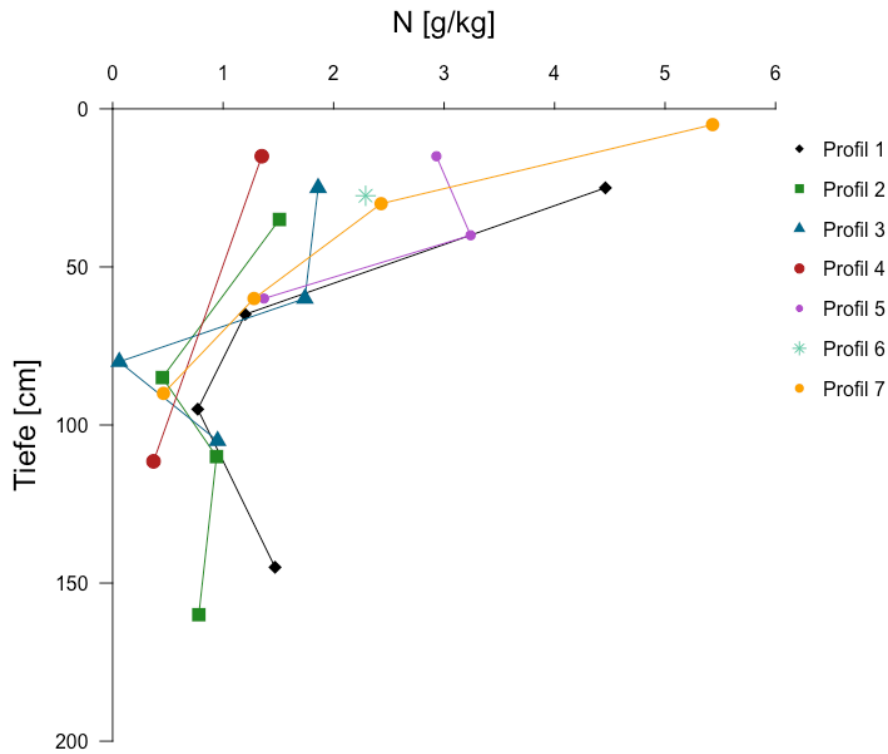


Abb. 26: Totaler N-Gehalt aller Bodenhorizonte der Profile 1 bis 7 in g/kg.

4.3.4 C/N-Verhältnis

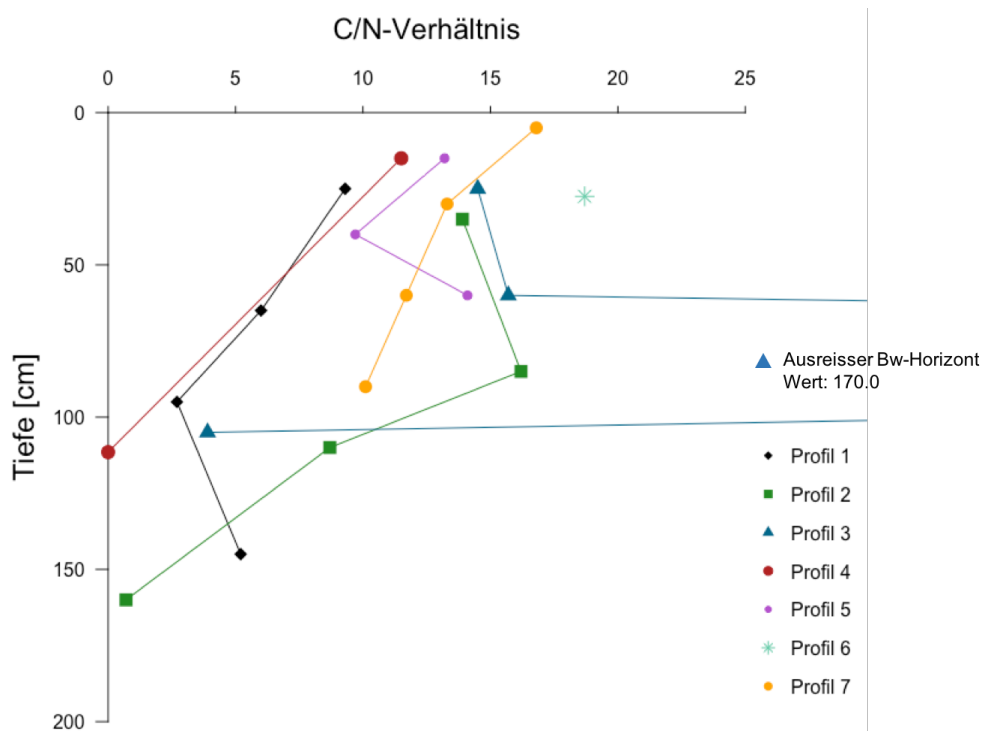


Abb. 27: C/N-Verhältnis aller Bodenproben der Profile 1 bis 7.

Der markierte Ausreisser in Profil 3 wurde in einer gemittelten Tiefe von 80 cm gemessen.

In Abb. 27 ist das, aus C_{org} und N_{tot} gebildete C/N-Verhältnis dargestellt. Es gibt den Anteil des N an der organischen Substanz an (Stahr et al. 2012). Bei allen Horizonten bewegt sich das Verhältnis zwischen 0 und 25, ausgenommen beim Bw-Horizont in Profil 3 ist ein Ausreisser zu beobachten, bei welchem der extrem hoher Wert von 170 berechnet wurde. Dies ergibt sich aufgrund des tiefen N-Gehaltes, der nahe an der Detektionsschranke liegt. Im C2-Horizont des Profils 4 liegt das Verhältnis bei 0 und ist somit am tiefsten. Auch in Profil 2 (Bs3-Horizont) ist ein auffallend tiefer Wert von 0.7 festzustellen, was eher typisch für einen C-Horizont wäre.

4.3.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)

Anhand der Röntgenfluoreszenzanalyse wurde der Gehalt von 43 verschiedenen Elementen pro Probe gemessen. Im Folgenden werden jedoch nur die 9 gängigsten bzw. diejenigen mit den höchsten Gehalten berücksichtigt und genauer analysiert (Tab. 4).

Tab. 4: Übersicht über die Gehalte der neun wichtigsten Elemente in den Profilen 1 bis 7 in g/kg.

Profil	Horizont	Al	Si	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Ti
1	Ah	84.7	259	6.61	11.95	30.19	16.78	27.7	0.90	3.37
	Bw	94.8	266	6.13	14.74	32.04	16.78	31.4	0.34	3.41
	BC	89.2	276	6.46	14.20	32.37	17.17	31.4	0.79	3.47
	schwarze Schicht	37.9	84	13.23	6.74	12.36	18.00	154.8	107.60	1.51
2	Ah	99.6	241	5.96	17.16	26.11	14.59	46.9	0.93	5.37
	2Bs1	90.2	255	5.71	15.97	30.63	14.17	40.1	1.48	4.64
	2Bs2	91.0	272	5.79	18.87	37.82	16.20	37.5	0.73	4.50
	2Bs3	92.2	251	7.49	17.60	27.40	14.58	41.7	1.14	4.70
3	Ah1	73.5	273	12.91	14.36	28.23	18.24	33.6	0.61	3.55
	Ah2	80.5	252	10.51	14.21	22.32	16.30	39.7	0.48	4.44
	Bw	88.7	244	8.58	18.56	21.93	15.44	43.2	0.46	4.69
	C	84.1	275	13.66	19.21	20.98	17.62	40.8	0.60	5.15
4	Ah	90.0	253	10.69	18.17	22.40	16.04	42.0	0.53	4.83
	C2	80.7	326	0.91	6.94	47.32	11.59	18.5	1.26	1.27
5	Ah	83.6	227	9.04	18.84	21.38	13.76	44.2	0.88	4.72
	Bw	88.1	226	8.20	18.73	22.79	13.58	46.8	0.80	4.92
	2Bs	91.6	229	8.46	17.69	23.62	15.34	45.6	0.55	4.60
6	Ah2	83.7	205	5.48	18.90	29.71	17.72	54.1	0.34	4.80
7	Ah1	72.4	182	12.75	17.68	18.53	14.13	44.4	1.40	4.87
	Ah2	91.4	219	9.41	21.29	22.11	13.83	52.5	0.74	5.87
	Bw	95.1	231	8.30	23.36	24.32	15.43	52.6	0.59	5.60
	C	92.8	243	13.57	34.57	22.10	16.31	49.5	0.54	4.97

Ein Blick auf die Werte in Tab. 4 zeigt, dass die einzelnen Elemente in allen Bodenhorizonten ähnliche Grössenordnungen aufweisen. In den meisten Fällen ist keine eindeutig lineare Zu- oder Abnahmen von unten nach oben im Profil zu registrieren. Häufig führen die Werte in den mittleren Horizonten zu einem Knick in der Verlaufskurve.

In fast allen sieben Profilen ist Silizium (Si) das dominierende Element, gefolgt von Aluminium (Al) und Eisen (Fe). Der mit Abstand am tiefsten gemessene Si-Gehalt ist der schwarzen Schicht in Profil 1 zuzuordnen. Verglichen mit den anderen Si-Werten beträgt er nur etwa 1/3 davon. Weiter lässt sich beim näheren Betrachten des Bodenprofils 1 feststellen, dass nicht nur der Si-Gehalt, sondern die komplette elementare Zusammensetzung der schwarzen Schicht von allen anderen Bodenhorizonten der Profile 1 bis 7 teilweise stark abweicht. So veranschaulicht das Tiefenprofil in Abb. 28 die Elementgehalte in den einzelnen Horizonten des Profils 1. Die meisten Elemente weisen Werte zwischen 0 und 50 g/kg auf und zeigen nur geringe Änderungen von oben nach unten im Profil. Der Si-Gehalt nimmt mit zunehmender Tiefe am stärksten ab, wobei er anfangs noch leicht zunimmt, in 100 cm Tiefe die markante Abnahme aber zu einem regelrechten Knick führt. Im Gegensatz dazu nehmen der Fe- und Mn-Gehalt unterhalb von 100 cm Tiefe stark zu, was zu auffallend hohen Werten in der schwarzen Schicht führt. Auch der Ca-Gehalt in der schwarzen Schicht ist etwa doppelt so hoch, wie in den anderen Horizonten dieses Profils.

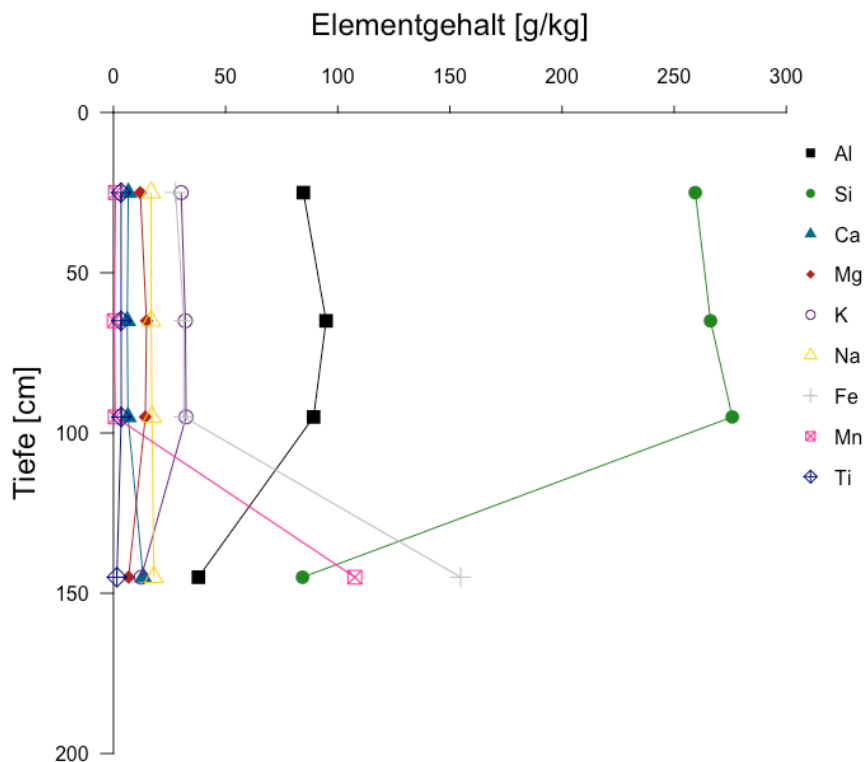
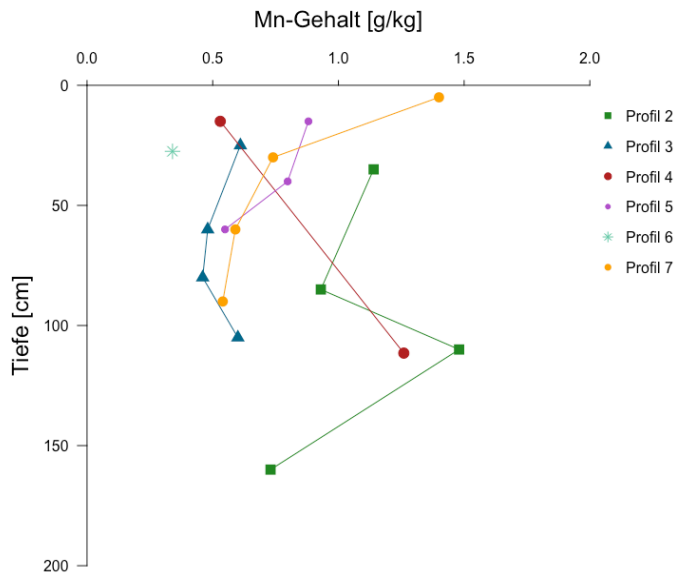


Abb. 28: Elementare Zusammensetzung des Profils 1 bei Anzonico in g/kg.

Wirft man einen genaueren Blick auf den Mangangehalt (Mn) und vergleicht ihn mit den übrigen sechs Profilen (Abb. 29 (a) und (b)), so sticht die schwarze Schicht in Profil 1 extrem heraus, denn tatsächlich ist

er in diesem Profil etwa um Faktor 100 höher als in den restlichen Proben. Dasselbe gilt auch für den Fe-Gehalt. In der schwarzen Schicht ist dieser Wert um ca. das dreifache höher als in den übrigen Proben (Abb. 30). Abb. 29 (a) und (b) verdeutlichen die enorme Differenz des Mn-Gehaltes in der Grössenskala. Der leicht schwankende Verlauf des Mn in den Profilen 2 bis 7 (Abb. 29 (a)) verliert durch die kleine Skala an Bedeutung.

(a)



(b)

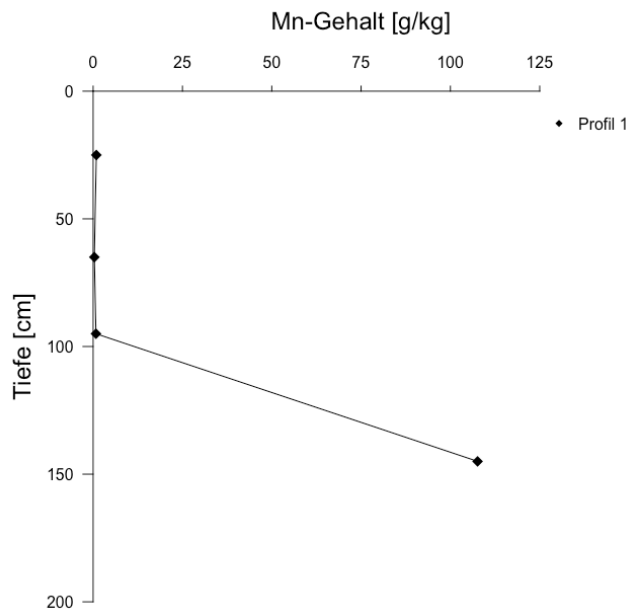


Abb. 29 (a) und (b): Mn-Gehalt in den Horizonten der Profile 2 bis 7 bzw. des Profils 1 in g/kg.

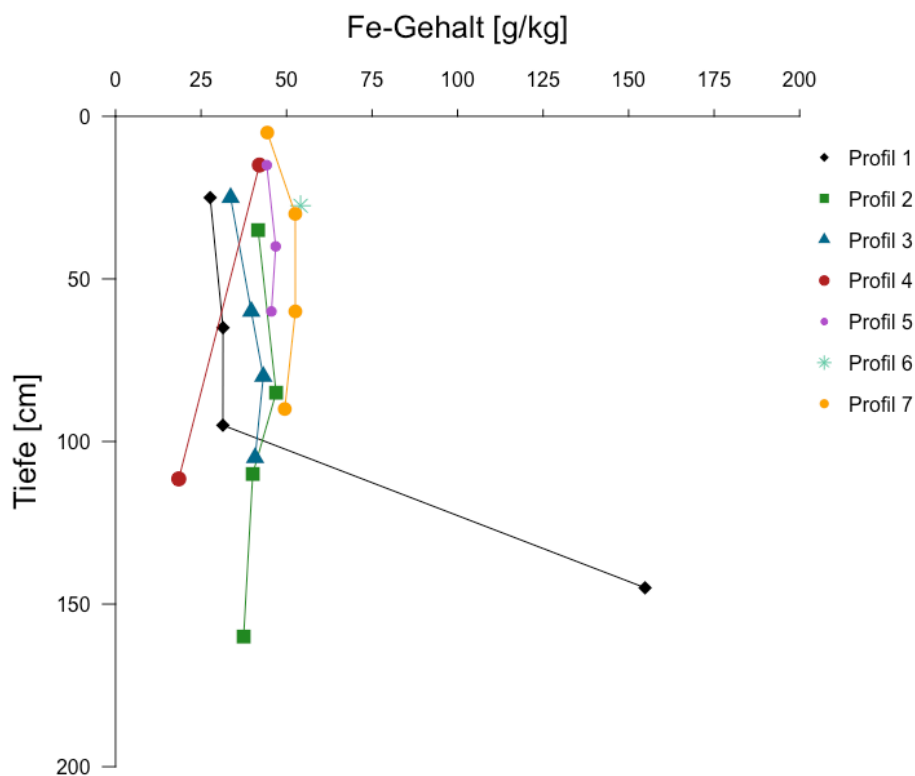


Abb. 30: Fe-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.

Im Gegensatz dazu nehmen der Si- und Al-Gehalt in der schwarzen Schicht stark ab (Abb. 31). Die restlichen Bodenhorizonte bewegen sich alle etwa im selben Grössenbereich. Bei den verbleibenden Elementen Mg, K, Na und Ti sind keine Auffälligkeiten bzw. grössere Abweichungen zwischen den einzelnen Bodenhorizonten festzustellen.

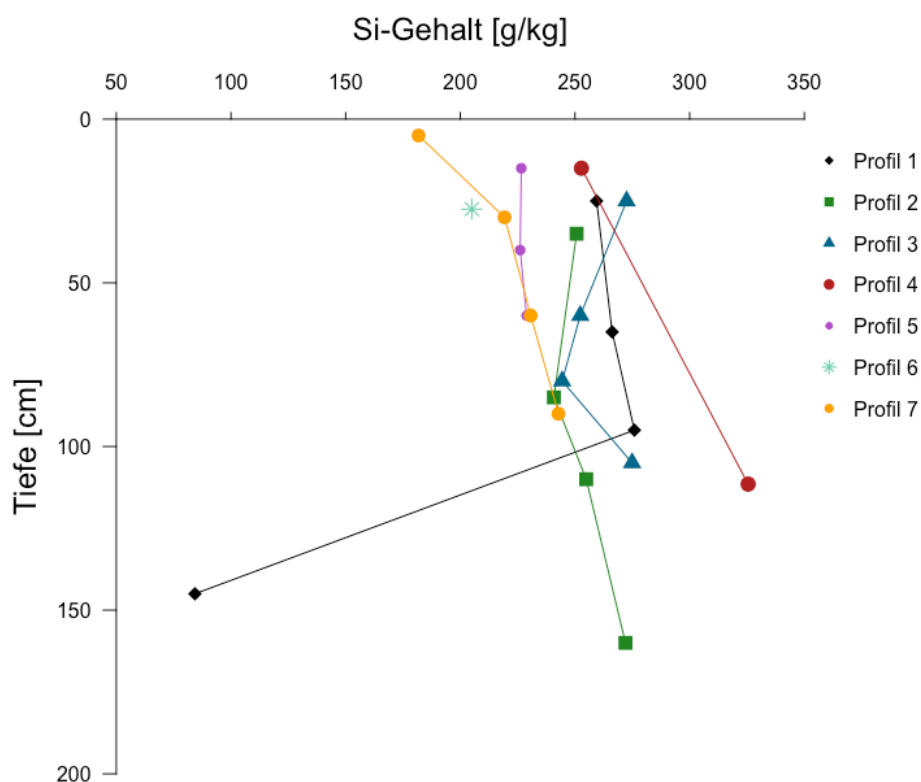


Abb. 31: Si-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.

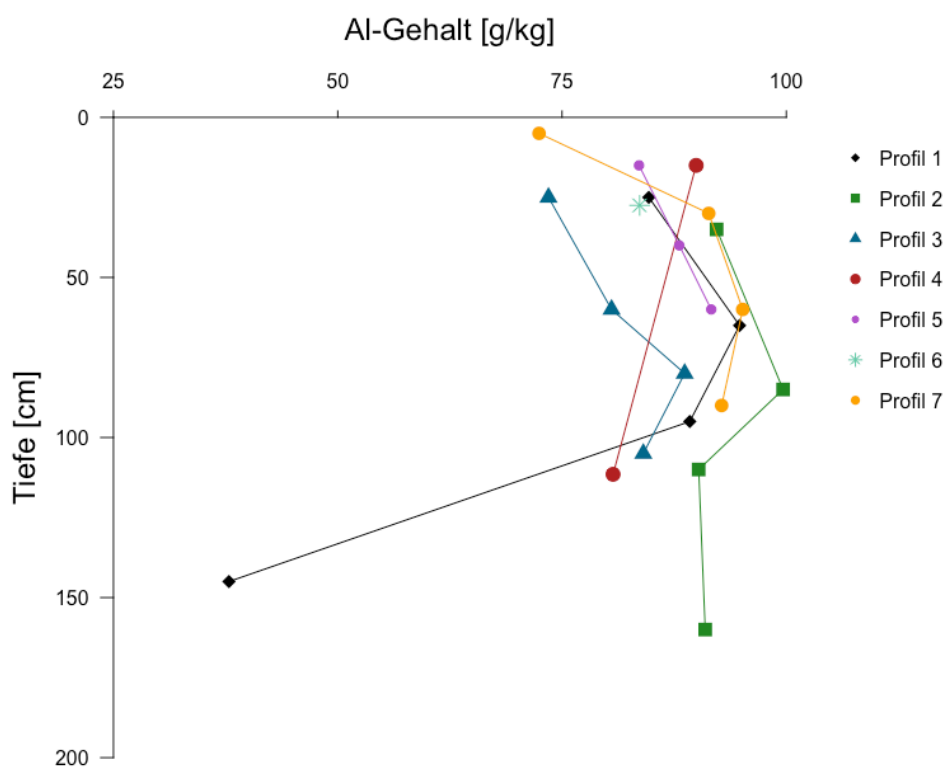


Abb. 32: Al-Gehalt in den Horizonten der Bodenprofile 1 bis 7 in g/kg.

4.3.6 ^{14}C -Altersbestimmung

Da nicht in allen Profilen Holzkohlepartikel für die ^{14}C -Datierung gefunden wurden, musste bei vier Horizonten Bodenmaterial mit der POM- bzw. H_2O_2 -Analyse datiert werden (Tab. 5).

Tab. 5: Übersicht über das Alter einzelner Bodenhorizonte (cal BP), von Profil 1 bis 5

Profil	Horizont	Probe-Nr. UZH	Probe-Nr. ETHZ	Aufbereitungsmethode	Konventionelles ^{14}C -Alter (BP)	$\delta\text{C}13$ ‰	$\pm 1\sigma$	Kalibriertes ^{14}C -Alter (cal BP), 2σ (95%)
1	Ah	6439	ETH-75845	H_2O_2 (Boden)	3527 ± 23	-44.8	1	3876 – 3720
	Schwarze Schicht	6426	ETH-74063	POM (Boden)	3839 ± 24	-20	1	4405 – 4151
2	2Bs1	6427	ETH-74071	Holzkohle	9145 ± 27	-22.2	1	10'391 – 10'234
	2Bs2	6428	ETH-74068	Holzkohle	5233 ± 24	-23.8	1	6171 – 5921
3	Ah2	6429	ETH-74069	Holzkohle	1572 ± 22	-23.7	1	1527 – 1409
	Bw	6430	ETH-74073	Holzkohle	1632 ± 23	-22.6	1	1604 – 1416
4	C2	6431	ETH-74072	POM (Boden)	3117 ± 24	-32.6	1	3389 – 3250
5	2Bs	6440	ETH-75846	POM (Boden)	2239 ± 22	-30.3	1	2334-2157

Tab. 5 zeigt die resultierenden Alter einzelner Proben im Boden. Die ^{14}C -Alter sind auf den 2 Sigma Bereich (95%-Konfidenzintervall) kalibriert. In den Horizonten 2Bs1, 2Bs2 (Profil 2), Ah2 und Bw (Profil 3) wurden Holzkohlepartikel gefunden und datiert. Bei den anderen vier Horizonten aus den Profilen 1 (Ah, schwarze Schicht), 4 (C2) und 5 (2Bs) wurde die Feinerde zuerst mit der POM-Analyse bzw. der H_2O_2 -Analyse behandelt.

Beim Ergründen der erhaltenen Altersdaten der einzelnen Bodenhorizonte wird klar, dass diese relativ stark variieren. Die Altersbandbreite reicht von 10'391 (d.h. etwa von Beginn des Holozäns) bis 1409 cal BP. Die beiden Horizonte des Profils 1 zeigen ähnliche Alter auf, was auch bei Profil 3 der Fall ist. Die Alter der Horizonte in Bodenprofil 2 weichen etwas stärker voneinander ab, wobei der Horizont 2Bs1, welcher oberhalb von 2Bs2 liegt, älter zu sein scheint. Bei den Profilen 4 und 5 konnte lediglich ein Horizont datiert

werden. Beide bewegen sich in einem ähnlichen Altersbereich. Im Allgemeinen ist somit kein eindeutiger Alterstrend (jüngeren Horizonte im oberen und älteren Horizonte im unteren Teil der Profile) zu erkennen.

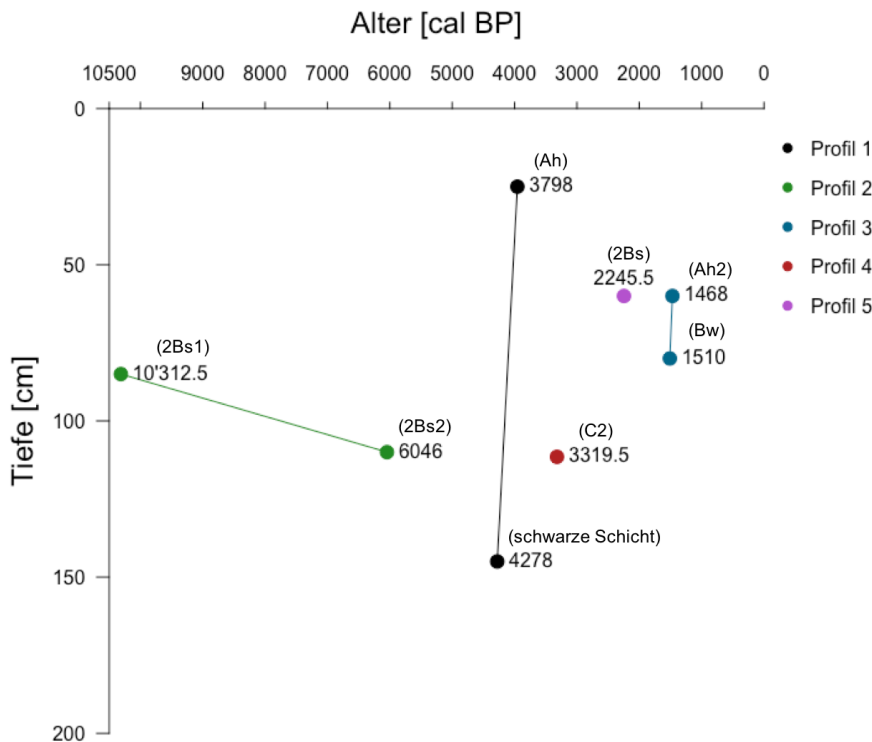


Abb. 33: Kalibrierte ^{14}C -Alter (cal BP) der gesammelten Holzkohlepartikel bzw. Bodenproben einzelner Horizonte der Profile 1 bis 5. Die einzelnen Punkte sind mit dem entsprechenden Alter und der Horizontbezeichnung gekennzeichnet.

4.3.7 Verwitterungsindex

Um Informationen über den Verwitterungsgrad eines Bodens und der damit verbundenen Landschaftsgenese zu erhalten, besteht die Möglichkeit verschiedene Verwitterungsindizes zu berechnen. Dies geschieht anhand der gemessenen Elementgehalte, welche auf unterschiedliche Art und Weise in ein Verhältnis gesetzt werden (Egli und Mirabella 2001). In vorliegender Arbeit wurden die Berechnungen für jeden Horizont mit Kalium (K), Kalzium (Ca) und dem immobilen Element Titan (Ti) durchgeführt. Dabei wurden die genannten Elemente wie folgt in ein molares Verhältnis gesetzt: $\frac{[K+Ca]}{[Ti]}$.

Abb. 34 zeigt bei den meisten Bodenprofilen eine leichte Erhöhung des Wertes mit zunehmender Tiefe, wobei bei einigen Profilen in den mittleren Horizonten eine vorübergehende Abnahme zu verzeichnen ist. Profil 4 weist die grösste Zunahme mit der Tiefe auf. Hierbei ist zu beachten, dass bei diesem Profil nur zwei Horizonte beprobt wurden. Im Allgemeinen bewegen sich die Werte hauptsächlich zwischen 7 und 15, wobei Profil 7 im Durchschnitt den tiefsten und Profil 4 den höchsten Verwitterungsindex aufweist.

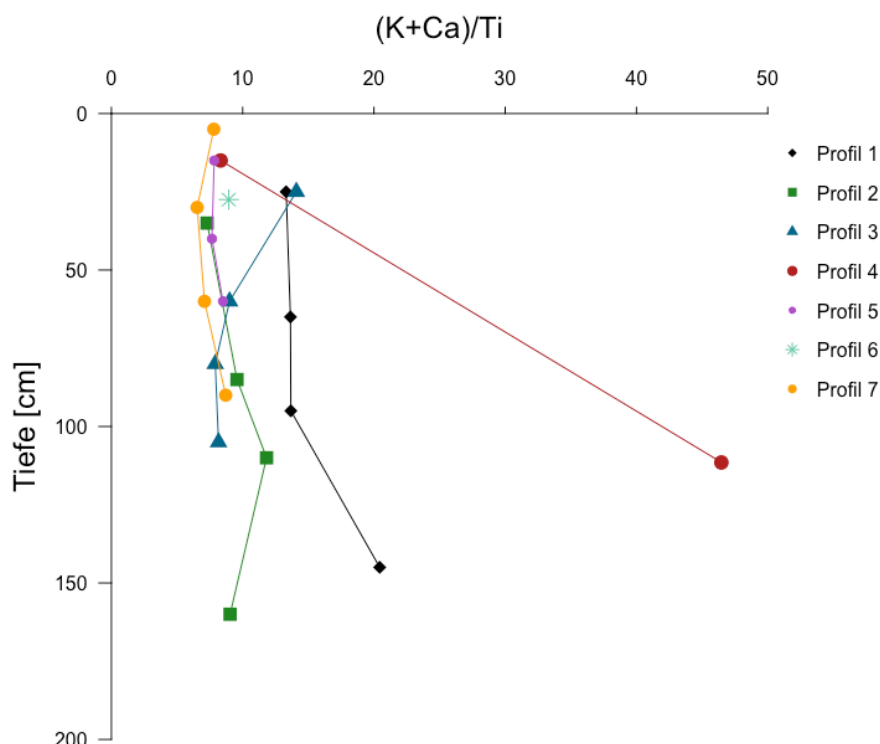


Abb. 34: Berechneter Verwitterungsindex $(K+Ca) / Ti$ für die Profile 1 bis 7.

4.4 Digitalisierung vergangener Ereignisse und Schutzbauten

Wie die Metadaten (Anhang 9.3 und 9.4) zeigen, reichen die digitalisierten Naturereignisse bis ins Jahr 1951 zurück. Es wurden die Ereignistypen aus Kap.3.6 erfasst (Abb. 35 und vergrößerte Ansicht in der Beilage), wobei die punktuell erfassten Events überwiegen. Es ist festzustellen, dass es vor allem in den Jahren 1993 und 2008 vermehrt Bewegungen im Untersuchungsgebiet gab. In beiden Jahren dominierten Erdbeben, gefolgt von Steinschlägen und Hangmuren. 1993 waren hauptsächlich die Gebiete rund um die Dörfer Anzonico, Cavagnago und Giornico betroffen, während im Jahr 2008 eher die Regionen unterhalb von Cavagnago, nahe der Autobahn A2 aktiv waren. Auch in den Jahren 1983, sowie 2003 bis und mit 2009 sind einige Ereignisse zu verzeichnen. Ein Vergleich dieser Ereignisse mit den Niederschlagsdaten aus Kap. 2.4 zeigt gewisse Übereinstimmungen (vergleiche auch Kap. 5.4.3). Wie ein Blick auf die erstellte Karte verrät, sind Steinschläge/Felsstürze die dominierenden Prozesse im Untersuchungsgebiet, dicht gefolgt von Erdbeben und Lawinen.

Um grössere Ereignisse mit schwerwiegenden Folgen zu verhindern, wurden und werden immer noch laufend diverse Arten von Verbauungen im Untersuchungsgebiet errichtet (Abb. 35). Dazu gehören Bremskörper, Windschutz, Mauern, Lawinenverbauungen und Netze sowie Dämme. Vor allem in den höher gelegenen Gebieten, unterhalb des Pizzo Erra und des Pizzo Alto sind viele Bauten zum Schutz vor Lawinenniedergängen zu finden. Zudem wurde direkt oberhalb des Dorfes Anzonico ein grösserer Damm gebaut. Weiter wurden oberhalb von Cavagnago viele Mauern, welche als Rutschungsverbauungen dienen, errichtet. Auf diesen Verbauungstypen trifft man auch unterhalb von Suaggia.

Naturereignisse und Schutzbauten im Untersuchungsgebiet (1951-2016)

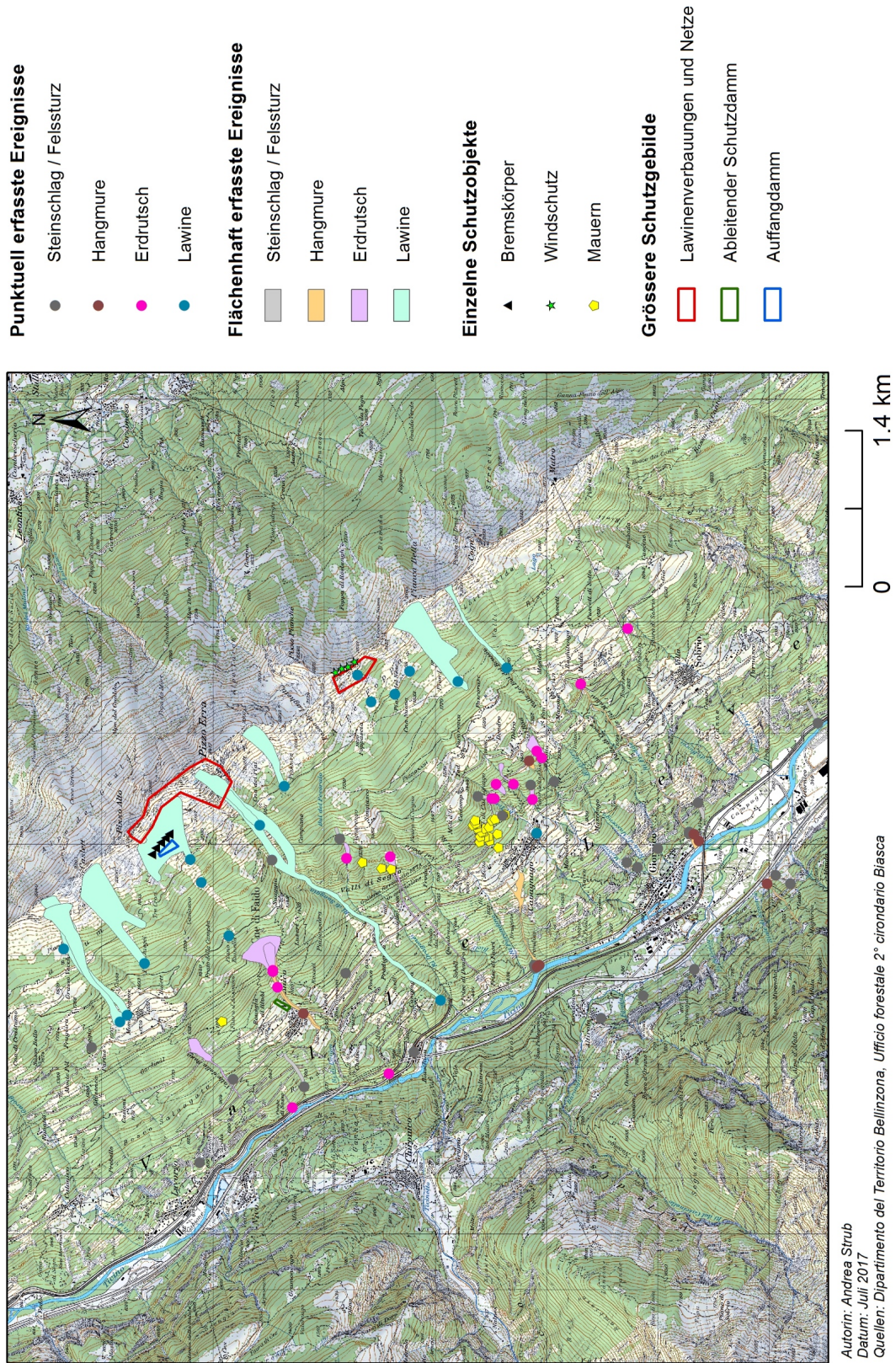


Abb. 35: Digitalisierte Karte.

Dargestellt sind vergangene Ereignisse seit 1951 sowie diverse Schutzbauten im Untersuchungsgebiet (Datengrundlage: Dipartimento del Territorio Bellinzona; Ufficio forestale 2° circondario Biasca).

Wasservorkommen im Untersuchungsgebiet

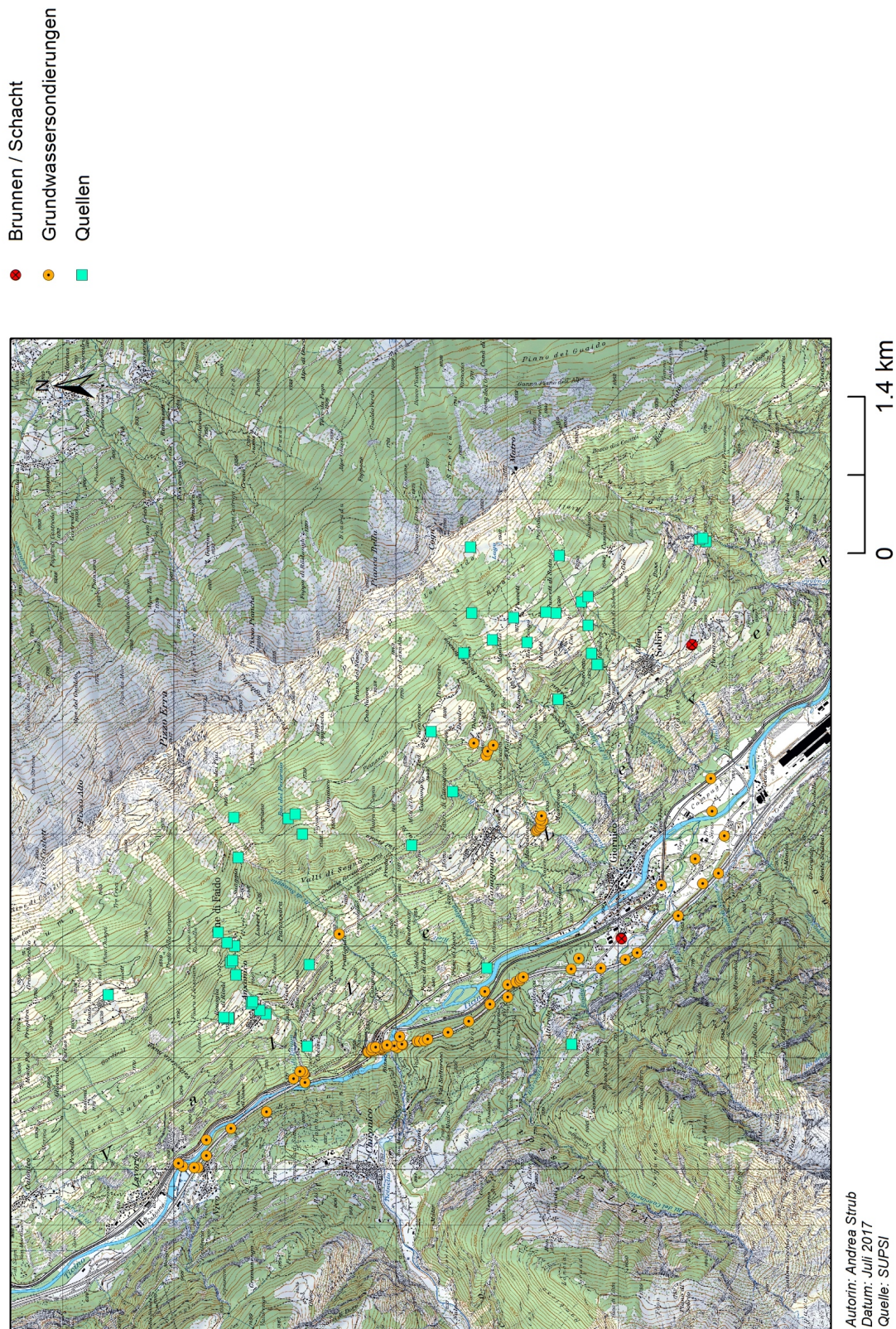


Abb. 36: Wasservorkommen im Untersuchungsgebiet.

Dargestellt sind Quellen, Brunnen und Grundwassersondierungen (Datengrundlage: SUPSI).

Betrachtet man das Wasservorkommen im Untersuchungsgebiet (Abb. 36 und zur vergrösserten Ansicht in der Beilage), so wurden 54 Quellen, 4 Brunnen und 73 Grundwassersondierungen vom SUPSI registriert. Der grösste Teil der Sondierungen befindet sich unten im Tal, entlang des Ticino. Die Quellen sind mehr oder weniger gleichmässig am Hang verteilt, wobei eine leichte Anhäufung bei Anzonico, im Gebiet des Baches Ri di Laium zu erkennen ist.

Auch sind einige Regionen als Schutzzonen der Klassen S2 (engere Schutzzonen) und S3 (weitere Schutzzonen) deklariert worden, welche ebenfalls vermehrt um Anzonico liegen (Abb. 37).

Im Allgemeinen sieht es nach ausreichend Wasser im Boden aus, jedoch liegen die Bodenprofile nicht direkt in diesen Schutzzonen.

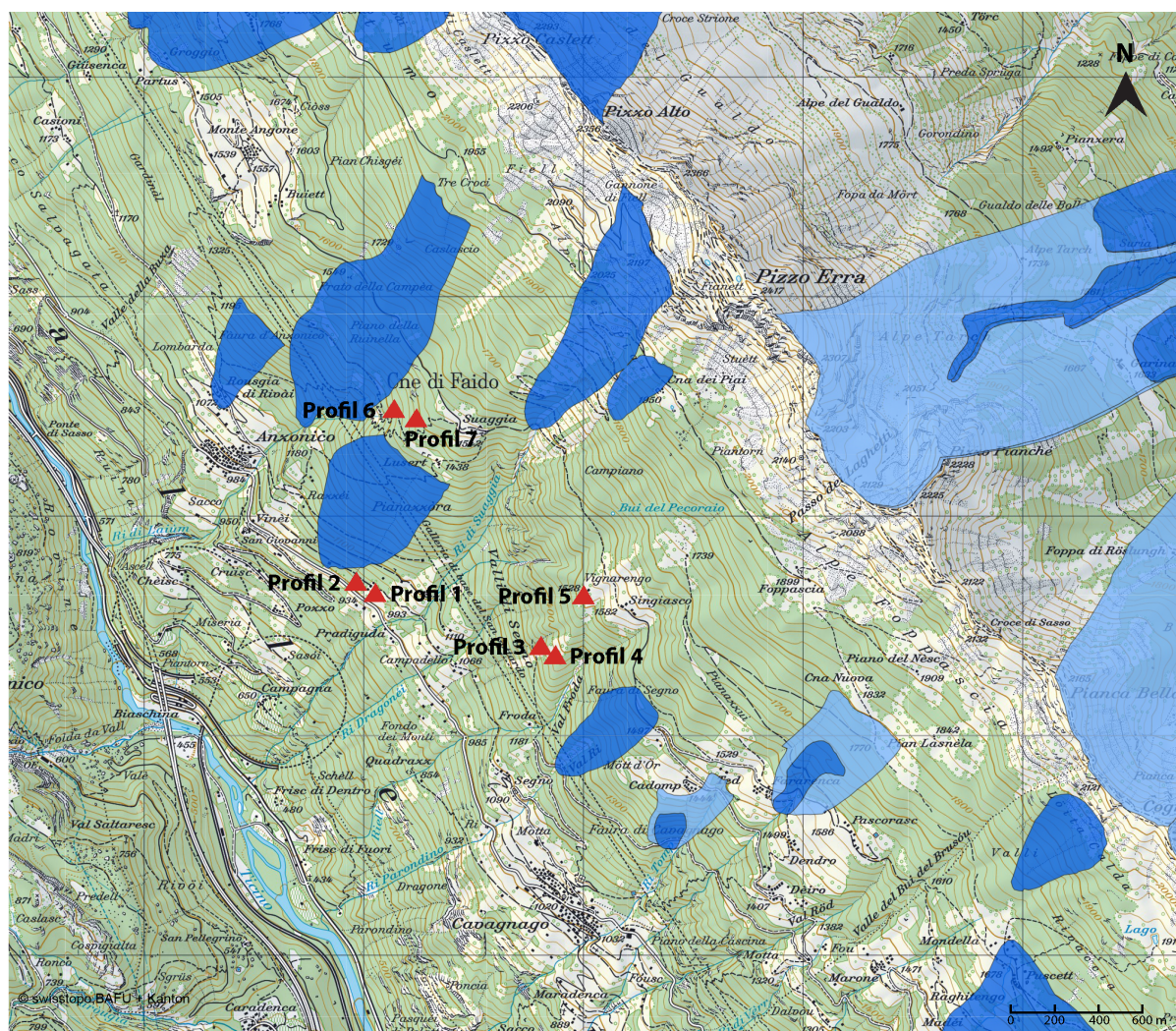


Abb. 37: Wasserschutzzonen im Untersuchungsgebiet.

Dunkelblaue Flächen entsprechen den engeren Schutzzonen (S2). Die hellblau gefärbten Polygone stellen die weiteren Schutzzonen (S3) dar. Die roten Dreiecke markieren die Bodenprofilstandorte (Grundwasserschutzzonen, BAFU, Datenstand:2013, ergänzte Darstellung).

5 Diskussion

Im Folgenden werden die in Kapitel 4 präsentierten Ergebnisse zur Feldarbeit in der oberen Leventina, zu den chemischen und physikalischen Bodenanalysen sowie zur Digitalisierung vergangener Ereignisse und zu Schutzbauten interpretiert und miteinander verknüpft. Es wurde versucht, die Bedeutung der schwarzen Schicht einzuordnen und die Entwicklung der Landschaft im Untersuchungsgebiet in Bruchstücken zu rekonstruieren. Aufgrund des kleinen Datensatzes wurde auf statistische Tests verzichtet.

5.2 Bodenchemie und -physik – schwarze Schicht vs. übrige Horizonte

Neben der erwähnten speziellen Konsistenz der schwarzen Schicht lassen auch der Chemismus sowie die physikalischen Eigenschaften vermuten, dass diese lediglich in Profil 1 zu finden ist. Die dunkler gefärbten Horizonte in den Profilen 3 und 4 weisen diesbezüglich nur minimale bis keine Ähnlichkeiten mit der schwarzen Schicht auf. So kann mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, dass es sich bei allen dunkleren Horizonten um dieselbe Schicht handelt.

Der Skelettgehalt beispielsweise ist bei der schwarzen Schicht in Profil 1 um ein Vielfaches geringer als bei den restlichen Horizonten (Abb. 20). Ein Vergleich mit Werten aus der Literatur (z.B. Egli et al. 2001, 2003) zeigt, dass eine Zahl von 0.7% in alpinen Böden nicht der Norm entspricht. Im Gegenteil – bei den meisten Böden ist ein relativ hoher Skelettgehalt von teilweise über 60% zu verzeichnen, was viel eher typische Werte für alpine Böden auf Schutt- oder Moränenmaterial sind (Egli et al. 2001). Dass der Skelettgehalt nicht überall eindeutig mit der Tiefe zu- oder abnimmt, könnte mit dem inhomogenen Aufbau von Schutt- bzw. Rutschungsmaterial oder mit Verwitterungsprozessen zusammenhängen (Egli und Mirabella 2001).

Die Bodenfarbe betreffend, wurden alle Böden als gelbbraun, braun oder rotbraun (Munsell Farbton 7.5 Y - 10YR) klassiert, was typische Farben für Böden in gemässigten Klimaten sind. Goethit ist hierbei das dominierende Mineral. Aufgrund seiner hohen Stabilität ist Goethit in Böden aller Klimabereiche zu finden und gilt als das häufigste pedogene Fe-Oxid (Scheffer und Schachtschabel 2010; Schaetzl und Anderson 2005). Das Mineral Hämatit (Fe_2O_3), häufig in Kombination mit Goethit, ruft eine eher rötliche Färbung hervor (wie sie in Profil 2 und 5 zu beobachten ist), wobei der Munsell Farbton mit 7.5 - 5YR beschrieben wird. All diese Farbtöne zeigen in der Regel aerobe Verhältnisse an (Scheffer und Schachtschabel 2010). Eine schwarze Färbung mit einem tiefen Grauwert, wie sie in Profil 1 beobachtet wurde, kann auf nasse Böden (Schaetzl und Anderson 2005) oder das Vorkommen von 4-wertigen Manganoxiden oder Kohleresten (Scheffer und Schachtschabel 2010) hindeuten. Dies wird partiell durch die Laboranalysen bestätigt. Es ist tatsächlich ein stark erhöhter Mn-Gehalt und damit verbunden ein hoher prozentualer Manganoxid-Gehalt (MnO) (siehe Anhang 9.1) in der schwarzen Schicht zu verzeichnen. Der C-Gehalt hingegen zeigt keinen atypischen Verlauf in Profil 1. Wie auch bei den übrigen sechs Bodenprofilen ist im Allgemeinen ein erhöhter Gehalt an C_{org} im Oberboden und eine reduzierte Konzentration im Unterboden

zu eruieren, eine Beobachtung, die auf die grössere Zufuhr an organischem Material in Oberflächennähe und auf einen ungestörten Abbau der organischen Substanz in der Tiefe zurückzuführen ist (Scheffer und Schachtschabel 2010). Die Zufuhr an organischer Substanz ist stark abhängig von Klima und Vegetation, Faktoren, die im ganzen Untersuchungsgebiet sehr ähnlich sind. Auch hier zeigt ein Vergleich mit erforschten Werten alpiner Böden, gebildet auf Paragneis oder Moränenmaterial, dass die, im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Gehalte im Normalbereich liegen (Egli et al. 2003, 2006; Egli und Mirabella 2001). Obwohl bei der schwarzen Schicht, im Gegensatz zu den anderen Horizonten in ähnlicher Tiefe, eine leichte Zunahme des C-Gehaltes gemessen wurde, liegt auch dieser Wert noch im Normalbereich und fällt nicht markant vom Rest ab.

Beim C/N-Verhältnis hingegen sticht ein Werte stark heraus. Der etwas dunkler gefärbte Horizont in Profil 3 hat mit 170 und verglichen mit allen anderen Horizonten, ein stark erhöhtes Verhältnis. Grund dafür ist der minimale N-Wert. Dies deutet höchstwahrscheinlich auf einen Messfehler hin. Grundsätzlich wird das C/N-Verhältnis mit der Tiefe enger, d.h. mit der Umsetzung der Streu zu Humus geht dem System mehr C als N verloren. N kann sich dadurch anreichern. Typische C/N-Werte für sehr stickstoffreiche organische Substanzen liegen zwischen 6 und 10, während sehr stickstoffarme Huminstoffe ein Verhältnis von über 25 aufweisen (Stahr et al. 2012). Ein Wert von 170 liegt deutlich über dem Normalbereich. Im Gegensatz dazu wurde beim C2-Horizont in Profil 4 und beim 2Bs3-Horizont in Profil 2 ein Wert von beinahe 0 gemessen. Für einen C-Horizont ist dies in seltenen Fällen realistisch, für einen Bs-Horizont eher ungewöhnlich. Aufgrund dessen wird auch hier ein Messfehler vermutet. Die übrigen Werte zeigen keine Auffälligkeiten.

Der vergleichsweise tiefe SiO_2 -Gehalt in der schwarzen Schicht wirft Fragen auf, denn der Orthogneis als Muttergestein enthält relativ viel Quarz (Scheffer und Schachtschabel 2010), was in den übrigen Horizonten durch den entsprechend hohen Si-Gehalt widerspiegelt wird. Zudem gilt SiO_2 als verwitterungsresistent (chemisch und physikalisch), sodass bei Verwitterung und Transportprozessen üblicherweise eine Anreicherung erfolgt (Scheffer und Schachtschabel 2010). Der tiefe Al-Gehalt in der schwarzen Schicht könnte auf seine vergleichbar leichte Auswaschbarkeit zurückzuführen sein (Blanck 1939). Da das Ausgangsgestein Gneis häufig durch die Metamorphose von Granit entsteht und die beiden Gesteine deshalb eine sehr ähnliche Zusammensetzung aufweisen, können Parallelen mit bestehenden Daten gezogen werden. So liefern Untersuchungen auf Böden mit granitischem Ausgangsgestein in den Schweizer Alpen (Wallis und Berner Oberland) (Egli et al. 2001; Egli und Mirabella 2001) ähnliche Werte wie die im Untersuchungsgebiet gemessenen.

Davon ausgeschlossen ist der stark erhöhte Gehalt an Mn und Fe in der schwarzen Schicht in Profil 1. Die hohen Werte der beiden Elemente sind normwidrig. Generell sind Böden der gemässigten Klimaten, im Gegensatz zu Böden in den Tropen und Subtropen, meist hämatitfrei (Scheffer und Schachtschabel 2010). Die schwarze Schicht zeigt mit einem Hämatit-Gehalt von über 22% (siehe Anhang 9.1) das Gegenteil. Nach Schaeztl und Anderson (2005) steht ein erhöhter Gehalt an Fe-Mineralen, speziell von Hämatit,

häufig in Verbindung mit Rubifikationsprozessen (Rotfärbung des Bodens durch Oxidation von Fe-Mineralen). Die schwarze Farbe der Schicht, welche keine Anzeichen einer rötlichen Färbung zeigt, spricht jedoch eher dagegen. Wird die Geologie im Untersuchungsgebiet genauer unter die Lupe genommen, stellt man auch hier fest, dass diese nicht der Grund für die spezielle Zusammensetzung der Schicht sein kann. Die Region hat geologisch gesehen keine Besonderheiten. Neben Gneis, Rutschungsmaterial und wenigen glazialen Ablagerungen ist nichts Aussergewöhnliches vorzufinden, was auf irgendeine Art und Weise Auswirkungen darauf haben könnte.

Eine weitere Vermutung für den Ursprung des hohen Fe- und Mn-Gehaltes bezieht sich auf den Wasserhaushalt bzw. das Grundwasservorkommen im Untersuchungsgebiet. Vor allem Manganoxide kommen oft in nassen Böden mit häufigen und alternierenden Oxidations- und Reduktionsphasen vor (Schaeztl und Anderson 2005; Stahr et al. 2012). Die Daten der SUPSI und des BAFU (Kap. 4.4) zeigen, dass zwar viele Quellen und Brunnen im Gebiet existieren, jedoch keine davon in direktem Kontakt mit den sieben Bodenprofilen stehen. Entsprechend liegen auch die Wasserschutzzonen nicht so, dass die untersuchten Böden unter deren direktem Einfluss stünden. Diese Umstände sprechen vorerst eher gegen das Wasservorkommen als Ursache.

Die detailliertere Untersuchung des pH-Wertes öffnet Raum für weitere Vermutungen. Alle sieben Böden weisen einen sauren bis stark sauren Charakter auf, ein bezeichnendes Merkmal für Böden auf Granit bzw. Gneis (Stahr et al. 2012). Profile 1 und 3 zeigen den, mit der Tiefe abnehmenden spezifischen Verlauf der Azidität, welcher im Oberboden mit dem Verlust von basischen Kationen (z.B. durch Nährstoffentzug) und der H^+ -Produktion durch mikrobielle Atmungsprozesse verursacht wird, am deutlichsten (Scheffer und Schachtschabel 2010). Der pH-Wert der schwarzen Schicht ist vergleichsweise hoch und sticht wiederum heraus, obwohl den pH-Wert beeinflussende Faktoren wie der Streueintrag, das Ausgangsgestein, der Vegetationstyp oder der Grundwasserstand bei allen Bodenprofilen ähnlich zu sein scheinen. Wie Stahr et al. (2012) schreiben, sind gewisse Redoxprozesse im Boden leicht zu erkennen. Dazu gehört der Prozess der Manganreduktion ($C_6H_{12}O_6 + 5MnO_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 6Mn^{2+}$), gut ersichtlich an der pechschwarzen Farbe des 4-wertigen Mn. Dies ist v.a. beim Ausscheiden des Mn ausserhalb des reduzierenden Bereichs markant. Ein ähnliches Phänomen lässt sich bei der Eisenreduktion ($C_6H_{12}O_6 + 4Fe_2O_3 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 8Fe^{2+}$) beobachten. Oxide des 3-wertigen Fe werden zu mobilem Fe^{2+} reduziert und dieses durch weitere Prozesse in pechschwarzes Eisensulfid umgewandelt. Weiter wirken Reduktionsprozesse als Säurepuffer (Stahr et al. 2012), womit der erhöhte pH-Wert in der schwarzen Schicht erklärt werden könnte. Aufgrund dieser Erkenntnisse, scheinen die beschriebenen Redoxprozesse höchstwahrscheinlich der Grund für die schwarze Farbe der untersuchten Schicht zu sein. Ausserdem deuten die reduzierten Bedingungen auf das Vorkommen von Wasser hin, was aber gegen die vorherige Vermutung, dass Wasser nicht der Grund für die spezielle Zusammensetzung der schwarzen Schicht sein kann, sprechen würde. Da sich die Redoxprozesse als beste Erklärung herauskristallisieren, stellt sich die Frage, ob in der entsprechenden Umgebung trotzdem ein vermehrtes Wasservorkommen herrscht und dieses nicht in den Daten des BAFU

registriert wurde. Aufgrund der gewonnenen und bereits erfassten Daten lässt sich dies nicht vollumfänglich beweisen.

5.3 Ausdehnung und potentielle Gefahr der schwarzen Schicht

Die geringe Anzahl punktueller Messungen macht es schwierig, die Ausdehnung der schwarzen Schicht im Untersuchungsgebiet zu bestimmen. Die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.1 und 5.2 lassen ableiten, dass die schwarze Schicht lediglich bei Profil 1 und somit nur an einer Stelle im Gebiet von uns entdeckt wurde. Gestützt auf Beobachtungen (Fotos) und Aussagen des lokalen Försters können jedoch Vermutungen über eine mögliche Ausdehnung gemacht werden. Abb. 38 stellt die vermutete Region dar.

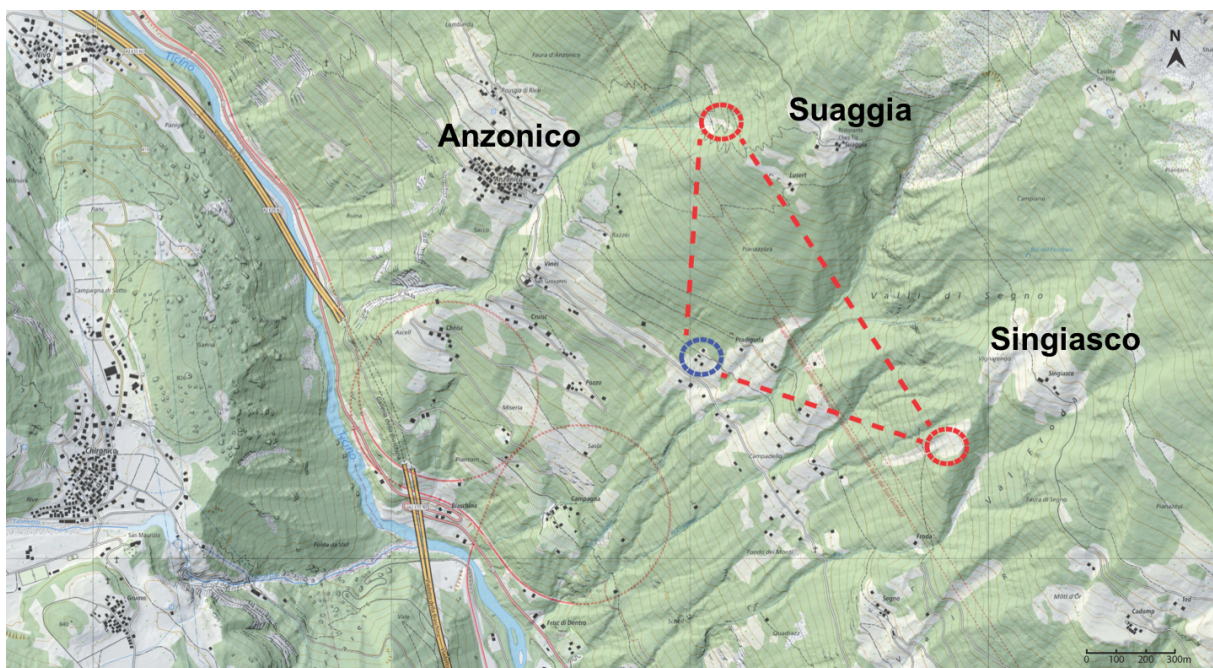


Abb. 38: Mögliche Ausdehnung der schwarzen Schicht.

Die rot-gestrichelte Linie stellt die hypothetische Ausdehnung der schwarzen Schicht dar. Die rot-gestrichelten Kreise stellen Regionen dar, in welchen die Schicht vor einigen Jahren bei Bauarbeiten gesichtet wurde. Der blau-gestrichelte Kreis markiert die Stelle des Profils 1, an welcher die schwarze Schicht im Laufe dieser Forschungsarbeit eindeutig entdeckt wurde (Digitale Landeskarte 1:25'000, swisstopo, Datenstand: 2008, ergänzte Darstellung).

Verbunden mit der Unsicherheit der gemutmassten Ausdehnung, ist es schwierig, eine eindeutige Aussage über die potentielle Gefahr der schwarzen Schicht für künftig grössere Rutschungen zu prognostizieren. Falls sie tatsächlich über eine grössere Fläche vorzufinden sein sollte, könnte deren schmierige Konsistenz durchaus eine potentielle Gefahr darstellen. Mit der Bildung eines Gleithorizontes (Asch et al. 1999) würde sie eine ideale Unterlage für eine grössere Hangrutschung bieten und eine solche begünstigen. Da die Bodenprofile im Untersuchungsgebiet generell aber mächtige Horizonte aufweisen, wird deutlich, dass bodenbildende Prozesse stattgefunden und es in letzter Zeit kein Ereignis extremen Ausmasses gegeben

haben kann (Haugland 2004; Schaetzl und Anderson 2005). Mit einer Profiltiefe von ca. 2 m ist insbesondere der Boden von Profil 1 gut und gleichmässig entwickelt und zeigt keine auffälligen Unregelmässigkeiten. Dies weist möglicherweise darauf hin, dass der Boden in dieser Umgebung nicht direkt unter Einfluss der gefundenen schwarzen Schicht steht, was deren potentielle Gefahr reduzieren würde. Doch auch bei diesen Aussagen handelt es sich nur um Vermutungen. Aussagekräftige Beweise fehlen und wie in Kap. 1.1.1 erwähnt, sind immer mehrere Faktoren für das Auslösen eines Rutschungsereignisses verantwortlich.

5.4 Dynamik und Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet

Aufgrund grösserer Lücken in den existierenden Daten kann die Dynamik und Entwicklung der Landschaft im Untersuchungsgebiet nicht vollumfänglich rekonstruiert werden. Dennoch wurde versucht, einzelne Bruchstücken zu einer möglichen Chronologie seit dem Gletscherrückzug zusammenzuführen.

5.4.1 Gletschergeschichte

Fehlende charakteristische Landschafts- bzw. Geländeformen erschweren die Rekonstruktion der genauen Gletschergeschichte im Untersuchungsgebiet. Wie in Kap. 2.3 erwähnt, war das Untersuchungsgebiet während des LGM beinahe vollständig mit Eis bedeckt. Lediglich die Gipfelregion des Pizzo Alto und des Pizzo Erra blieben eisfrei. Insbesondere der Gletscherrückzug hat das ganze Tal stark geprägt, indem er steile Felsflanken hinterliess und wie in situ Beobachtungen zeigen, ein sogenanntes Trogtal bildete. Dieses entwickelte sich im Verlaufe des Spätglazials und des Holozäns zunehmend zu einem Kerbtal, welches heute vom Fluss Ticino durchflossen wird.

5.4.2 Erfasste Rutschungen

Die relativ grosse Altersbandbreite der untersuchten Bodenhorizonte kann ein möglicher Hinweis auf die allgemeine Aktivität und Instabilität des Untersuchungsgebietes sein.

Bei fast allen Profilen (bei welchen Datierungen vorgenommen wurden) sind die oberen Horizonte jünger als die darunterliegenden, was einer gängigen Bodenentwicklung bzw. stratigraphischen Abfolge entspricht (Glaser et al. 2016; Löffler und Vossmerbäumer 2002). Bei Profil 2 ist dies nicht der Fall, denn der 2Bs1-Horizont ist etwa doppelt so alt wie der darunterliegende 2Bs2-Horizont. Diese Altersabfolge sowie die undeutlichen Horizonte lassen eine Rutschung bzw. Überschiebung von mehreren Böden vermuten. Ein weiterer möglicher Grund für die „verkehrte“ Altersabfolge bzw. Inversion könnten bestehende Makroporen im Boden sein (Scheffer und Schachtschabel 2010), durch welche Holzkohlepartikel jüngeren Alters aus oberen Schichten in ältere, untere Schichten fielen. Aufgrund der beobachteten Färbung mit der unklaren Horizontabfolge ist die erste Variante wahrscheinlicher.

Ein weiteres Indiz für mögliche vergangene Rutschungen liefert der berechnete Verwitterungsindex der Bodenhorizonte. Er zeigt grösstenteils einen normalen Verlauf. Je tiefer der Wert bzw. je kleiner das Verhältnis, desto verwitterter ist der Bodenhorizont. Tiefe Werte sind somit normalerweise im oberen und

höhere im unteren Teil des Bodens zu beobachten (Scheffer und Schachtschabel 2010), was v.a. bei Profil 4, aber auch bei Profil 1 schön zu erkennen ist. Profile 2 und 3 zeigen eher einen umgekehrten Verlauf mit einem sinkenden Verhältnis mit der Tiefe. Dies könnte ein Hinweis auf eine vergangene Rutschung sein, was bei Profil 2 mit der Altersdatierung übereinstimmen würde. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kam es dort zwischen 10'000 und 6000 cal BP zu mehreren Rutschungen. Bei Profil 3 könnten die etwas geringeren Bodenmächtigkeit sowie das jüngere Alter, welche auf erhöhte Aktivität in der Umgebung hindeuten, die Vermutung einer Rutschung unterstreichen. Die beiden sehr ähnlich alten Horizonte in diesem Profil deuten auf eine Rutschung um ca. 1500 cal BP hin.

Das datierte Alter des Ah-Horizontes in Profil 1 (3876-3720 cal BP) weicht stark von demjenigen ab, welches von Egli und Ivy-Ochs (2009) am selben Standort, in derselben Tiefe und mit derselben Methode datiert wurde – ein interessantes Phänomen. Dazumal resultierte ein Alter von 20'245-19'885 cal BP, was einen beträchtlichen Unterschied zum aktuell Gemessenen darstellt. Verglichen mit der schwarzen Schicht aus demselben Profil, macht das aktuell gemessene Alter mehr Sinn. Bei den 2009 erhobenen Daten wäre der Ah-Horizont um ein Vielfaches älter als die darunterliegende schwarze Schicht (4405-4151 cal BP) und somit sogar älter als der Bergsturz von Chironico. Dies, obwohl die Probenahme in der Abrisszone des Bergsturzes liegt. Nach Butler (1959) kann ein Boden nie älter sein, als das Ablagerungsmaterial innerhalb dessen er geformt wurde oder als die letzte Stabilitätsphase der geomorphologischen Oberfläche, auf welcher der Boden gebildet wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Datierung einer Rutschung bei Profil 1. Das jüngste organische Material in der schwarzen Schicht ist nur wenig älter als das älteste organische Material im darüberliegenden Horizont. Somit liegen zwei beinahe gleichaltrige Böden vor. Fazit: Vor ca. 3800 Jahren muss es eine Rutschung gegeben haben, bei welcher die schwarze Schicht überschüttet wurde.

5.4.3 Ereignisse während der letzten 60 Jahre

Vergleicht man die Bodenmächtigkeiten mit den digitalisierten Ereignissen, so ist festzustellen, dass in der Region der mächtigeren Böden der Profile 1 und 2 in den letzten 60 Jahren, mit Ausnahme einer Lawine, kein schwerwiegendes Rutschungsereignis stattgefunden hat. Dies würde wiederum bestätigen, dass es im Terrain bei Profil 1 seit längerer Zeit keine grössere Aktivität gegeben hat, welche den Boden massgebend beeinflusst hätte. Bei Profil 2 scheinen die, für die durchmischten Horizonte verantwortliche(n) Rutschung(en) definitiv älter zu sein, denn auch hier wurden in den letzten 60 Jahren keine grösseren Rutschungen registriert. Im Gebiet unterhalb von Singiasco (Profile 3, 4, und 5) wurde hingegen eine etwas grössere Aktivität (Bsp. grosse Rutschung 1993, siehe Metadaten im Anhang 9.3 und 9.4) verzeichnet und entsprechend digitalisiert. Nicht auszuschliessen ist, dass diese für die etwas geringmächtigeren Profile mitverantwortlich ist. Die Bodenprofile 6 und 7 sind ebenfalls nicht ganz so mächtig wie diejenigen der Profile 1 und 2. Sie befinden sich leicht oberhalb einer Zone, in welcher es vor allem im Jahr 1983

Instabilitäten gab. Die Verteilung der kartierten Anrissstellen und der Waldschneisen auf den Luftbildern passt ebenfalls zu diesen Vermutungen.

Folglich weisen insbesondere zwei Bodenprofile innerhalb der Abrisszone des Bergsturzes von Chironico auf eine reduzierte Aktivität als ausserhalb davon hin. Die Theorie von Cruden (1997) mit der sinkenden Instabilität eines Hanges nach jedem Bergsturzereignis würde dadurch bestätigt.

Die registrierten und digitalisierten Ereignisse liefern einen detaillierteren Einblick in die Dynamik der untersuchten Region während der letzten 60 Jahre. Generell weisen Hangneigungsangaben von 30° bis 40° auf eine beträchtliche Steilheit des Gebietes hin, auf welcher vorherrschende Dynamikprozesse zu basieren scheinen. Die Digitalisierung vergangener Ereignisse im Untersuchungsgebiet zeigt, dass vor allem die niederschlagsreichen Jahre mit der Anzahl stattgefundener Events korrelieren. Diesbezüglich sind die Jahre 1993 und 2008 auffallend. In beiden Jahren wurden verhältnismässig grosse Niederschlagsmengen gemessen (2177.5 mm bzw. 1850.3 mm) (MeteoSchweiz, 2017) und damit verbunden eine Anhäufung von Ereignissen verzeichnet (Metadaten im Anhang 9.3 und 9.4). Ein Blick auf die präzisen Daten sowie die Monats- und Tagesniederschlagswerte von MeteoSchweiz (2017) verstärkt die Aussage. Häufig wurden an Tagen mit starkem Niederschlag, oder kurz danach, Rutschungsereignisse registriert. Im Jahr 2009 wurden ebenfalls vermehrt Naturereignisse festgehalten obwohl im Allgemeinen etwas weniger Starkniederschläge gemessen wurden (MeteoSchweiz 2017). Im Jahr 2000 war das Umgekehrte der Fall. Es wurde die zweithöchste Jahresniederschlagssumme (2085.3 mm) (Zeitperiode 1982-2016) verzeichnet (MeteoSchweiz 2017), während sich die Anzahl registrierter Ereignisse erstaunlicherweise in Grenzen hält. Die einzelnen Ereignisse scheinen nicht ganz so intensiv gewesen zu sein, weshalb weniger Bewegungen ausgelöst wurden.

Interessant sind auch die Geschehnisse des Winters 1950/51, worüber Berichte, jedoch keine exakten Messdaten gefunden wurden. Langandauernde und intensive Schneefälle prägten diesen Winter in den Schweizer Alpen. Während der Monate November, Januar und Februar wurden extreme Schneemengen verzeichnet, unter anderem auch im Tessin, mit 300-400% der üblichen Januar-Niederschläge. Schuld daran waren zwei komplett unterschiedliche Wetterlagen. Eine beständige, starke Nordwest-Staulage im Januar 1951 und eine ausgeprägte Süd-Staulage im darauffolgenden Monat, kombiniert mit einer instabilen Schichtung und einer enormen Neuschneeüberlast, führten zu schweren Lawinenergebnissen auf der Alpennord- bzw. Alpensüdseite (Latarnser und Ammann 2001). Eine Grosslawine donnerte vom Pizzo Erra (zwischen Anzonico und Cavagnago) durch das Untersuchungsgebiet und verschüttete die Gotthardlinie der SBB meterhoch. Mit total 1500 Lawinenniedergängen und 98 Todesopfern in den Schweizer Alpen war die allgemeine Zerstörung gross (Latarnser und Ammann 2001; Starck 2011). Wie die Recherche nach vergangenen Naturgefahrenereignissen zeigt, sind Lawinenniedergänge im Untersuchungsgebiet auch nach dem Winter 1950/51 bis heute von zentraler Bedeutung. Nicht nur die Lawinenergebnisse an sich, sondern auch deren indirekter Einfluss auf den Boden (Destabilisierung durch das Niederreisen und Entwurzeln von

Bäumen) haben eine negative Wirkung auf die Stabilität des Gebietes (Bebi et al. 2009). Fortlaufend werden Massnahmen ergriffen (v.a. in der Region des Pizzo Erra und Pizzo Alto), um den Schutz umliegender Dörfer zu gewährleisten. So wurde direkt oberhalb des Dorfes Anzonico ein ableitender Schutzdamm errichtet, welcher das Dorf vor grossen Lawinnenniedergängen und Rutschungen bewahren soll. Bereits im Jahre 1667 wurde Anzonico durch eine Lawine mehrheitlich zerstört. 88 Menschen verloren damals ihr Leben (Dipartimento del Territorio 2009).

Ein weiteres prägendes Ereignis geschah im Herbst 1993. Aufgrund stark anhaltender Niederschläge löste sich im Oktober unterhalb von Singiasco auf ca. 1400 m ü. M. ein Erdbeben, der bis zur Kantonsstrasse reichte und diese sowie die Strada Alta (Weg von Anzonico nach Segno) beschädigte (Grandi 2016).

5.4.4 Chronologische Abfolge vergangener Ereignisse

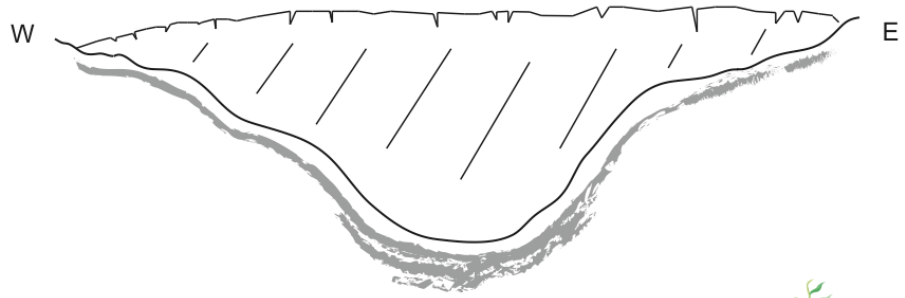
Basierend auf den Interpretationen des Kapitels 5.4 wurde versucht, zusammenfassend eine Chronologie der Landschaftsentwicklung zu erstellen. Abb. 39 veranschaulicht den groben Ablauf der beschriebenen Ereignisse vom LGM bis heute. Zusammengefasst kann die Landschaftsentwicklung wie folgt beschrieben werden:

Das Untersuchungsgebiet in der Leventina war während des LGM fast vollständig mit Eis bedeckt. Nur wenige Bergspitzen, wie der Pizzo Erra und der Pizzo Alto, blieben eisfrei. Wie Vermutungen zeigen, war das Gebiet erst nach dem Gschnitz-Stadial, einem erneuten Gletschervorstoss, vollständig vom Eis befreit (16'000 cal BP) (Claude et al. 2014; Renner 1982). 3000 Jahre später, im Spätglazial, prägte ein gewaltiger Bergsturz mit einem Volumen von über 500 Mio. m³ das ganze Tal. Die Bergsturzablagerungen füllten den Talboden, blockierten den Ticino und lagerten sich anschliessend mehrheitlich auf der westlichen Talseite ab. Durch den natürlich gebildeten Damm, entstand nördlich des Ablagerungsmaterials ein ca. 30 m tiefer, temporärer See, der über eine Zeitspanne von ca. 120-730 Jahren bestehen blieb (Antognini und Volpers 2002). Der Ticino suchte sich seinen neuen Weg auf der östlichen Seite des Ablagerungsmaterials und breitete sich fortlaufend aus. Dadurch erodierte mehr und mehr Ablagerungsmaterial. Das Tal entwickelte sich zu einem Kerbtal. Während der Zeitpanne von 10'000 bis 6000 cal BP gab es westlich des Dorfes Anzonico (bei Profil 2), eine instabile Phase mit mehreren Rutschungen. Etwas später, 3800 cal BP, setzte sich diese aktive Phase nicht weit entfernt davon fort (bei Profil 1). Um 1500 cal BP wurde bei Profil 3 eine Rutschung festgestellt. Obwohl ab diesem Zeitpunkt im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine jüngeren Rutschungen mehr datiert wurden, scheint sich die Instabilitätsphase im Untersuchungsgebiet bis in die Gegenwart fortgesetzt zu haben. Bestehende Daten und Berichte beweisen, dass es insbesondere seit den letzten 60 Jahren immer wieder zu Naturgefahrenereignissen wie Rutschungen und Lawinen kam, mit teilweise verheerende Folgen.

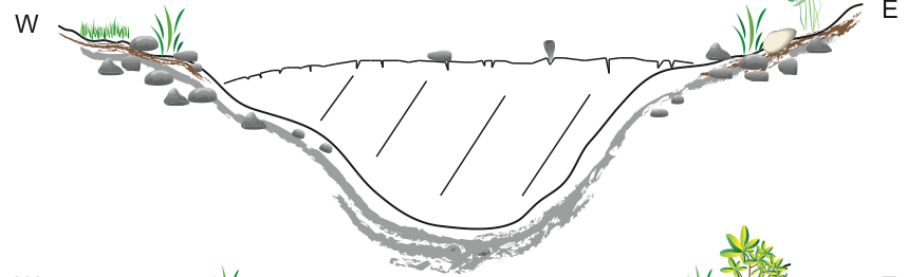
Obwohl die, während dieser Arbeit tatsächlich erfassten Rutschungen ein hohes Alter aufweisen, zeigen die registrierten kleineren und grösseren Naturgefahrenereignisse der vergangenen 60 Jahre, dass immer noch grosse Teile des Untersuchungsgebietes kontinuierlich in Bewegung sind. Gerade rund um die Profilstandorte 3 bis 7 deuten mehrere, durch Massenbewegungen entstandene Waldschneisen,

Anrissstellen und jüngerer Baumwuchs auf eine permanente Dynamik hin. Ausserdem ist aufgrund des fortschreitenden Klimawandels mit einer Zunahme von Extremereignissen wie Starkniederschlägen zu rechnen (IPCC 2012), was wiederum Massenbewegungsprozesse begünstigen kann und folglich das Errichten von Schutzbauten unerlässlich macht.

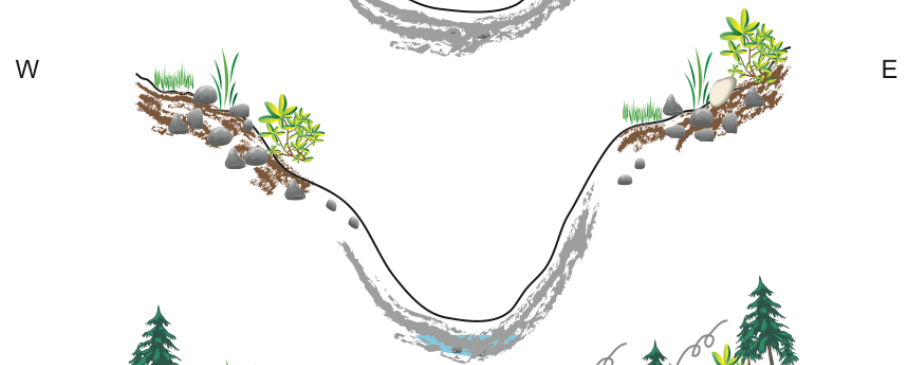
24'000 cal BP
LGM



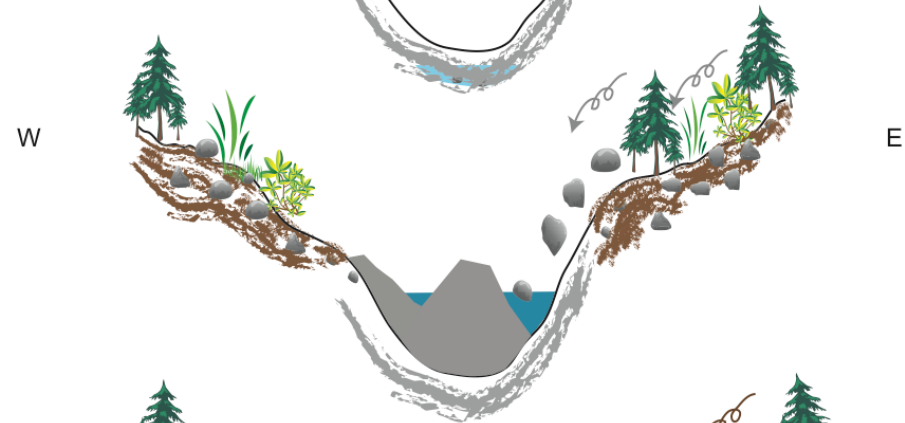
17'000 cal BP
Gschnitz-Stadial



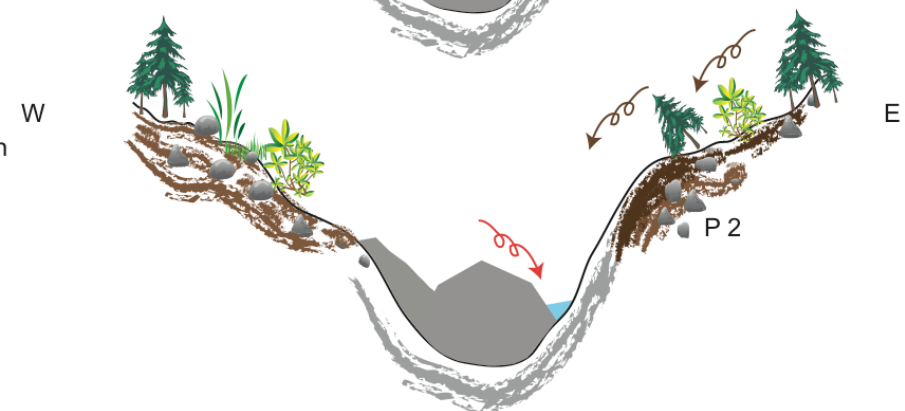
16'000 cal BP
Gletscherrückzug



13'000 cal BP
Bergsturz von
Chironico



10'000-6000 cal BP
Mehrere Rutschungen
bei Profil 2 (P2)



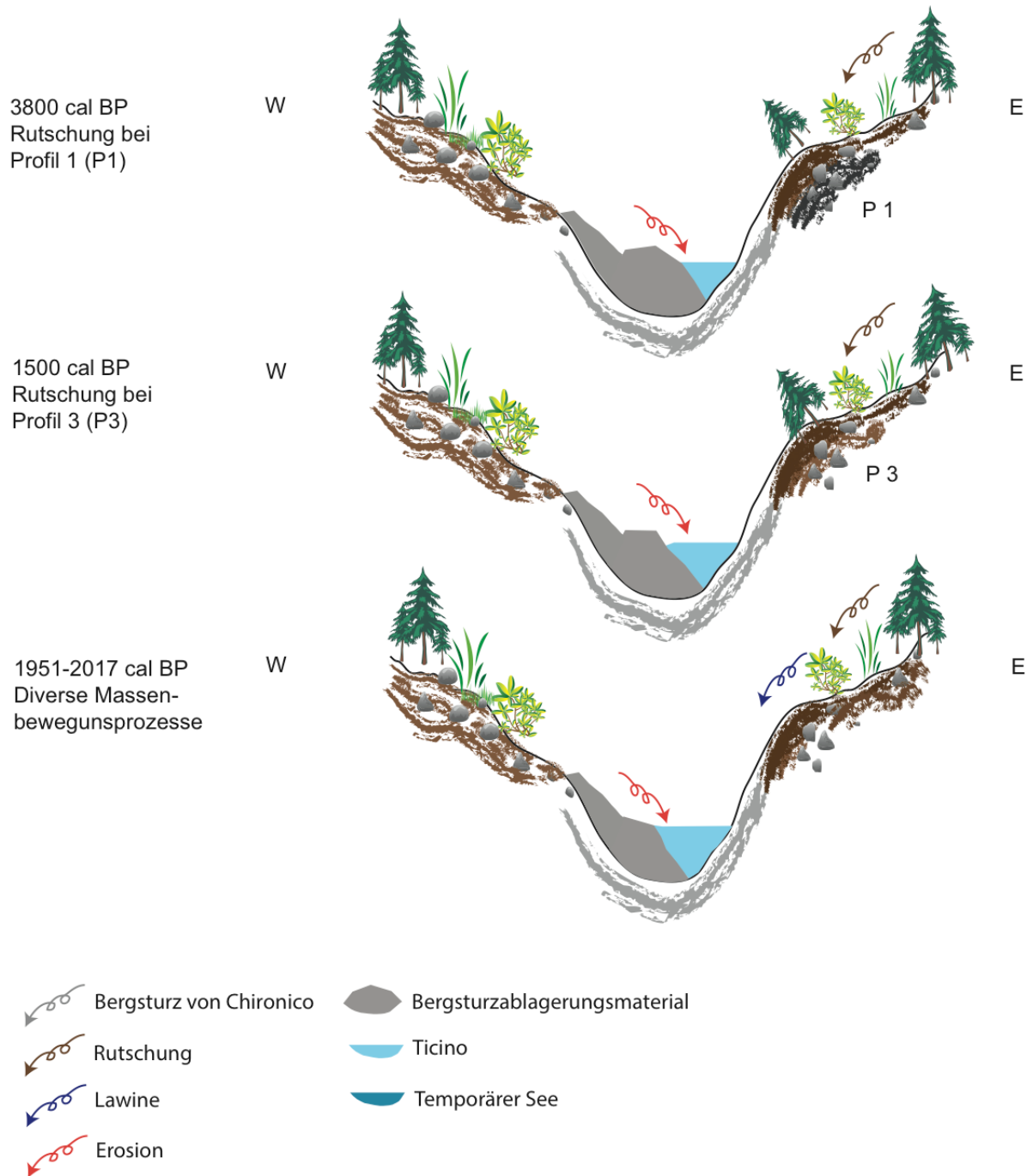


Abb. 39: Möglicher, bruchstückhafter Ablauf der Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet zur Zeit des Hoch-, Spätglazials und Holozäns.

Dargestellt sind die, auf der östlichen Talseite stattgefundenen Ereignisse vom LGM bis heute. Der Begriff Rutschung ist auch hier allgemein und beinhaltet verschiedene Arten von hangabwärts gerichteten Massenbewegungen aus Gestein, Erde oder Schutt.

6 Schlussfolgerung

Die physikalischen und chemischen Bodenuntersuchungen im Gebiet oberhalb von Anzonico in der Leventina zeigten, dass die gesuchte „mysteriöse“ schwarze Schicht tatsächlich eine aussergewöhnliche elementare Zusammensetzung aufweist und sich stark von den übrigen Bodenhorizonten unterscheidet.

Insbesondere wurde ein vergleichsweise stark erhöhter Fe- und Mn-Gehalt nachgewiesen. Dies in Kombination mit einem erhöhten pH-Wert lässt vermuten, dass die Ursache für die spezielle Zusammensetzung und Färbung auf vorherrschende Redoxprozesse zurückzuführen ist. Die Mangan- sowie Eisenreduktion können zur beobachteten dunklen Bodenfärbung führen und gleichzeitig als Säurepuffer wirken, was den erhöhten pH-Wert erklären würde. Ausserdem deuten die reduzierten Bedingungen auf das Vorkommen von Wasser hin, was jedoch in Konflikt mit bestehenden Daten zum Wasservorkommen im Untersuchungsgebiet steht. Das Erlangen eindeutiger Beweise verlangt nach Überprüfung und detaillierten Untersuchungen des Wasserhaushaltes in der entsprechenden Region.

Die tatsächliche Ausdehnung sowie die Abschätzung der potentiellen Gefahr der schwarzen Schicht auf künftige Rutschungen erwies sich als schwierig, da die genannte Schicht im Rahmen dieser Masterarbeit lediglich an einer Stelle (bei Profil 1) entdeckt wurde. Obwohl die feuchte, schmierige Konsistenz durchaus eine Gefahr darstellen könnte, sprechen die gut entwickelten Böden, welche auf eine geringe Aktivität in der entsprechenden Umgebung hindeuten, eher gegen eine grosse potentielle Gefahr.

Die ¹⁴C-Datierung einzelner Holzkohlepartikel und Bodenproben ergab eine beträchtliche Altersbandbreite (ca. Beginn Holozän bis 1409 cal BP) und ermöglichte das Erfassen einzelner vergangener Rutschungen im Untersuchungsgebiet. So scheint es bei Profil 2 zwischen 10'000 und 6000 cal BP mehrere Rutschungen gegeben zu haben. Bei Profil 1 wurde eine vor ca. 3800 Jahren stattgefundene Rutschung erfasst, bei welcher die schwarze Schicht überdeckt wurde, während bei Profil 3 eine Rutschung um ca. 1500 cal BP vermutet wurde.

Vergleiche mit den registrierten Ereignissen der letzten 60 Jahren bestätigen, dass im Gebiet der mächtigeren Böden (Profile 1 und 2), die sich in der Abrisszone des Bergsturzes von Chironico befinden, aktuell eine reduzierte Aktivität herrscht. In Regionen mit geringmächtigeren Böden (Profile 3, 4 und 5 ausserhalb der Abrisszone des Bergsturzes von Chironico) ist eine grössere Instabilität zu verzeichnen. Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass die niederschlagsreichen Jahre häufig mit der Anzahl stattgefunderer Events korrelieren und wiederkehrend Naturgefahrenereignisse stattgefunden haben und noch immer stattfinden.

Die bruchstückhafte Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung im Untersuchungsgebiet seit dem Rückzug der Gletscher zeigte, dass die Leventina während des LGM beinahe vollständig mit Eis bedeckt war und der Gletscherrückzug um 16'000 cal BP steile Talflanken hinterliess. In den nachfolgenden Jahren kam es im Gebiet wiederholt zu Massenbewegungsprozessen, welche sich bis in die heutige Zeit fortsetzen. Aktuell scheint nicht die Region, in der die schwarze Schicht beobachtet wurde, sondern eher das Gebiet

rund um die Profilstandorte 3 bis 7 instabil zu sein. Wie sich diese Aktivitäten in Zukunft verändern werden, ist schwer zu beurteilen. Tatsache ist, dass im steilen Untersuchungsgebiet dauernd Instabilitäten herrschen, was das Errichten von Bauten zum Schutz der Bevölkerung unerlässlich macht.

7 Ausblick

Mit vorliegender Masterarbeit konnte ein guter Überblick über die Rutschungsaktivität im Gebiet rund um das Dorf Anzonico geschaffen werden. Die chemischen und physikalischen Untersuchungen der Bodenproben im Labor haben interessante Informationen zu deren Zusammensetzung geliefert. Insbesondere konnte damit erklärt werden, dass die schwarze Schicht ein rätselhaftes Phänomen im Untersuchungsgebiet darstellt. Um exaktere Aussagen über deren Ausdehnung zu machen und eindeutig zu beurteilen, ob sie eine potentielle Basis für künftige Rutschungen darstellt, müsste die Anzahl der Bodenprofile und Proben in einem feineren Raster untersucht werden. Generell würde das tiefere Ausheben der Profile weitere Erkenntnisse liefern. Laut Aussagen des lokalen Försters wurde die schwarze Schicht teilweise in einer Tiefe von bis zu 3 m gesichtet. Da das Ausheben solch tiefer Bodenprofile in diesem extrem steinigen Untergrund von Hand beinahe unmöglich ist, müssten entsprechende Geräte/Maschinen zur Verfügung stehen, sofern die Steilheit und Unwegsamkeit des Gebietes deren Verwendung überhaupt zulässt. Um dem Phänomen der schwarzen Schicht noch einen Schritt näher zu kommen, müsste der Wasserhaushalt intensiver erforscht werden.

Für eine detailliertere Rekonstruktion der Hangdynamik und Landschaftsentwicklung könnten zusätzlich zur Bodenanalyse und den ¹⁴C-Datierungen dendrochronologische Untersuchungen vorgenommen werden. Eine Analyse der Baumringe könnte Hinweise über einzelne vergangene Rutschungs- und Klimaereignisse liefern. Abrundend könnte die vertiefte Forschung im Bereich historischer Ereignisse im Untersuchungsgebiet weitere Lücken schliessen.

Ausserdem wäre es sinnvoll, alle künftig stattfindenden Ereignisse sauber in digitaler Form festzuhalten, d.h., die als Bestandteil dieser Arbeit erarbeitete Digitalisierung weiterzuführen und parallel zu dokumentieren. Dies gibt einen guten Überblick über die Problemzonen des Gebietes, wodurch Schutzmassnahmen schneller ergriffen und umgesetzt werden können.

Die Einschätzung potentieller Gefahren könnte durch die weiträumige Installation von Bewegungssensoren erleichtert werden. Zwischen Profil 6 und 7 wird dies bereits gemacht. Weiter könnten laut Tralli et al. (2005) fernerkundliche Untersuchungen auf lokalen räumlichen Skalen mit zeitlich variabler Auflösung hilfreich sein.

8 Literatur

- AEBERHARD S., BURI H., KIENHOLZ H., UND ROTH H. 2013. Achtung, Naturgefahr! Verantwortung des Kantons und der Gemeinden im Umgang mit Naturgefahren. AG NAGEF - Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kantons Bern.
- ALLABY M. 2008. A dictionary of earth sciences. Oxford University Press
- ANTOGNINI M., UND VOLPERS R. 2002. A late Pleistocene age for the Chironico rockslide (Central Alps, Ticino, Switzerland). *Bull. angew. Geol.* 7, 2: 113–125.
- VAN ASCH TH. W. J., BUMA J., UND VAN BEEK L. P. H. 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30: 25–32.
- BALLANTYNE C. K. 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews* 21: 1935–2017.
- BEBI P., KULAKOWSKI D., UND RIXEN C. 2009. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems? State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management* 257, 9: 1883–1892.
- BINI A., BUONCRISTIANI J. F., COURTERRAND S., ELLWANGER D., FLEBER M., FLORINETH D., GRAF R., KELLER O., KELLY M., SCHLÜCHTER C., SCHOENEICH, P. 2009. Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), 1:500'000. Bundesamt für Landestopografie Swisstopo.
- BLANCK E. 1939. *Handbuch der Bodenlehre*.
- BRONK RAMSEY C., UND SHAREN LEE B. 2013. Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon* 55, 2/3: 720–730.
- BRUNNER H., NIEVERGELT J., UND PEYER K. 2002. *Klassifikation der Böden der Schweiz. Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definitionen der Begriffe, Anwendungsbeispiele. 2. Auflage.* Hrsg. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Luzern.
- BÜCHI M. 2009. *Holozäne Bergstürze im Alpenraum. Verbreitung, Ursachen und paläoklimatologische Deutung.* Bachelorarbeit. Geographisches Institut Universität Zürich
- BUTLER BE. 1959. *Periodic phenomena in landscapes as a basis for soil studies.* Soil Publication no. 14. Melbourne, Australia, CSIRO.
- CARCAILLET C. 2001. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14 C dates. *The Holocene* 11,2: 231–242.
- CHURCH M., UND RYDER JM. 1972. Paraglacial Sedimentation: A Consideration of Fluvial Processes Conditioned by Glaciation. *Geological Society of America* 83: 3059–3071.
- CLAUDE A. 2012. *Geomorphology and landscape evolution of the Chironico landslide (Leventina Valley, southern Swiss Alps),* Master Thesis, ETH Zurich.
- CLAUDE A., IVY-OCHS S., KOBER F., ANTOGNINI M., SALCHER B., UND KUBIK P. W. 2014. The Chironico landslide (Valle Leventina, southern Swiss Alps): age and evolution. *Swiss Journal of Geosciences* 107: 273–291.
- CROCI-MASPOLI M., SCHERRER S., SCHLEGEL T., UND ZUBLER E. 2014. *Klimaszenarien Schweiz - eine*

- regionale Übersicht. Fachbericht Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz Nr. 243, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- CRUDEN D., UND VARNES D. 1996. Landslide types and processes. Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation* 247: 36–75.
- CRUDEN D. M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* Nr. 43: 27-29.
- CRUDEN D. M. 1997. Rapid mass movements and climate: a North American perspective. *Paleoclimate Research* 19: 371–378.
- DAL VESCO E. 1979. Viadotto della Biaschina. *Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein* 97: 739–741.
- DAPPLES F., OSWALD D., RAETZO H. 2003. New records of Holocene landslide activity in the Western and Eastern Swiss Alps: implication of climate and vegetation changes. *Eclogae geol. Helv.* 96: 1–9.
- DIPARTIMENTO DEL TERRITORIO. 2009. Messaggio: Progetto di premunizione valangaria del Pizzo Erra sopra Anzonico numero 6219.
- EGLI M., BRANDOVÁ D., SANDRA R., WOODHATCH I., UND ZOLLINGER B. 2016. Geochronology laboratory methods. University of Zurich, Department of Geography.
- EGLI M., FITZE P., UND MIRABELLA A. 2001. Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: results from chronosequences of Swiss alpine environments. *Catena* 45: 19–47.
- EGLI M., UND IVY-OCHS S. 2009. Landscape evolution of the Upper Leventina: Dating using ¹⁴C, soils and ¹⁰Be. Excursion guide, Geochronology Summer School.
- EGLI M., UND MIRABELLA A. 2001. Bodenkundliche Untersuchungen im spät- und postglazialen Bereich des Hinteren Lauterbrunnentals (Berner Oberland, Schweiz): Bodenchemischer und -mineralogischer Vergleich zweier Podsole auf unterschiedlich alten Moränen. *Geographica Helvetica* 56, 2: 117–132.
- EGLI M., MIRABELLA A., SARTORI G., UND FITZE P. 2003. Weathering rates as a function of climate: results from a climosequence of the Val Genova (Trentino, Italian Alps). *Geoderma* 111: 99–121.
- EGLI M., MIRABELLA A., SARTORI G., ZANELLI R., UND BISCHOF S. 2006. Effect of north and south exposure on weathering rates and clay mineral formation in Alpine soils. *Catena* 67: 155–174.
- EUSTERHUES K., RUMPEL C., KLEBER M., UND KÖGEL-KNABNER I. 2003. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation. *Organic Geochemistry* 34: 1591–1600.
- FISCHER H. 2017. Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) – Grundlagen – X-Ray Materialanalyse: <http://materialanalyse.com/> (Zugriff: 03.04.2017).
- FREUND H. 2008. Eiszeitalter und Gegenwart E & G. *Quaternary Science Journal* 57, 1/2.
- GLASER R., HAUTER C., FAUST D., GLAWION R., SAURER H., SCHULTE A., UND SUDHAUS D. 2016. *Physische Geographie kompakt*. Spektrum Akademischer Verlag.
- GRANDI L. 2016. Considerazioni sul settore Traversa dal 1980 al 2015. Dipartimento del Territorio.

- GREGORICH EG., UND JANZEN HH. 1996. Storage of Soil Carbon in the Light fraction and Macroorganic Matter. In: Structure and organic matter storage in agricultural soils: 167–192.
- GRUNER U. 2006. Bergstürze und Klima in den Alpen - gibt es Zusammenhänge? Bulletin für angewandte Geologie 11, 2: 25–34.
- HAHN-WEINHEIMER P., HIRNER A., UND WEBER-DIEFENBACH K. 1995. Röntgenfluoreszenzanalytische Methoden. Grundlagen und praktische Anwendungen in den Geo-, Material- und Umweltwissenschaften. 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin.
- HAJDAS I. 2008. The Radiocarbon dating method and its applications in Quaternary studies. Quaternary Science Journal 57, 1/2: 2–24.
- HANTKE R. 1983. Eiszeitalter. Westliche Ostalpen mit ihrem bayerischen Vorland bis zum Inn-Durchbruch und Südalpen zwischen Dolomiten und Mont Blanc. Band 3. Ott Verlag, Thun.
- HAUGLAND JE. 2004. Formation of patterned ground and fine-scale soil development within two late Holocene glacial chronosequences: Jotunheimen, Norway. Geomorphology 61, 3: 287–301.
- HOVIUS N., STARK C. P., UND ALLEN P. A. 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. Geology 25, 3: 231–234.
- IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- IUSS WORKING GROUP WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006. Ein Rahmen für internationale Klassifikation, Korrelation und Kommunikation.
- IUSS WORKING GROUP WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106.
- IVY-OCHS S., POSCHINGER A V., SYNAL H-A., UND MAISCH M. 2009. Surface exposure dating of the Flims landslide, Graubünden, Switzerland. Geomorphology 103: 104–112.
- JOERIN U. E., STOCKER T. F., UND SCHLÜCHTER C. 2006. Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. The Holocene 16, 5: 697–704.
- KIENHOLZ H., ZEILSTRA P., UND HOLLENSTEIN K. 1998. Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. BUWAL/Eidg. Forstdirektion.
- LATELTIN O., HAEMMIG C., RAETZO H., UND BONNARD C. 2005. Landslide risk management in Switzerland. Landslides 2: 313–320.
- LATERNSENER M., UND AMMANN W. J. 2001. Der Lawinenwinter 1951. Schweiz. Z. Forstwes. 152: 25–35.
- LÖFFLER G., UND VOSSMERBÄUMER H. 2002. Mit unserer Erde leben: Beiträge der Fakultät für Geowissenschaften der Universität Würzburg.
- LOLLINO G., GIORDANO D., CROSTA G. B., COROMINAS J., AZZAM R., WASOWSKI J., UND SCIARRA N.

- (HRSG). 2015. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Landslide Processes Part I.
- MAISCH M. 2000. Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien. Vdf, Hochschulverlag an der ETH.
- MANI P., UND CADUFF U. 2012. Klimasensitivität Naturgefahren Teil 1: Methodenbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- MAXELON M., UND MANCKTELOW N. S. 2005. Three-dimensional geometry and tectonostratigraphy of the Pennine zone, Central Alps, Switzerland and Northern Italy. *Earth-Science Reviews* 71: 171–227.
- MCCOLL S. T. 2012. Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology* 153/154: 1–16.
- MCGEEHIN J., BURR GS., JULL A. J. T., REINES D., GOSSE J., DAVIS P. T., MUHS D., UND SOUTHON J. R. 2001. Stepped-combustion ¹⁴C dating of sediment: A comparison with established techniques. *Radiocarbon* 43, 2A: 255–261.
- METEOSCHWEIZ. 2017. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Datenportal für Lehre und Forschung (IDAweb).
- METEOSCHWEIZ. O.J. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie:
<http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klima-normwerte.html> (Zugriff: 05.04. 2017).
- MIRSKY S. B., LANYON L. E., UND NEEDELMAN B. A. 2008. Evaluating Soil Management Using Particulate and Chemically Labile Soil Organic Matter Fractions. 72 : 180–185.
- MÖBUS G. 1997. Geologie der Alpen. Eine Einführung in die regional-geologischen Einheiten zwischen Genf und Wien.
- NÄGELI H. 1920. Die postglazial-prähistorischen Biaschina-Bergstürze, Inaugural-Dissertation, Universität Zürich.
- NICOLUSSI K., UND PATZELT G. 2000. Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. *The Holocene* 10: 191–199.
- NIGGLI P., PREISWERK H., GRÜTTER O., BOSSARD L., UND KÜNDIG E. 1934. Geologische Beschreibung der Tessiner Alpen zwischen Maggia- und Bleniotal. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz. Geologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.
- PLANTE A.F., CHENU C., BALABANE M., MARIOTTI A., UND RIGHI D. 2004. Peroxide oxidation of clay-associated organic matter in a cultivation chronosequence. *European Journal of Soil Science* 55: 471–478.
- POPESCU M. E. 1994. A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 50: 71–74.
- POSCHINGER A. 2002. Large Rockslides in the Alps: A commentary on the contribution of G. Abele (1937-1994) and a review of some current developments. In: Evans, S., De Graff, J. V. (eds.), *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence and Mechanisms, Reviews in Engineering Geol.* The Geological Society of America.

- PRAGER C., ZANGERL C., PATZELT G., UND BRANDNER R. 2008. Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8: 377–407.
- PREISWERK H., BOSSARD L., NIGGLI E., KÜNDIG E., UND AMBÜHL E. 1934. Geologische Karte der Tessiner Alpen zwischen Maggia- und Bleniothal, 1:50'000. Geologische Spezialkarte Nr. 116.
- RAETZO H., LATELTIN O., BOLLINGER D., UND TRIPET J. P. 2002. Hazard assessment in Switzerland - Codes of practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 61: 263–268.
- REIMER P. J., BARD E., BAYLISS A., BECK J. W., BLACKWELL P. G., UND RAMSEY C. B. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50.000 years cal BP. *Radiocarbon* 55, 4: 1869–1887.
- RENNER F. 1982. Beiträge zur Gletschergeschichte des Gotthardgebietes und dendroklimatologische Analysen an fossilen Hölzern, Geographisches Institut Universität Zürich.
- RICHTER D. 1974. Grundriss der Geologie der Alpen.
- RUCH P., UND KUNZ P. 2001. Comparaisons des signatures isotopiques, chimiques, minéralogiques et biologiques dans le Gerzensee (BE). Vdf Hochschulverl. an der ETH Zürich.
- SCHAETZL R., UND ANDERSON S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press
- SCHARDT H. 1910. L'éboulement préhistorique de Chironico (Tessin). *Bolletino della Società Ticinese di Scienze Naturali* 6: 76–91.
- SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P. 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- SHACKLEY MS (HRSG). 2011. *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*. Berkeley, USA.
- SIEGENTHALER U., UND HEIMANN M. 1980. 14 C variations caused by changes in the global carbon cycle. *Radiocarbon* 22, 2: 177–191.
- SOLDATI M., CORSINI A., UND PASUTO A. 2004. Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late glacial. *Catena* 55: 141–161.
- STAHR K., KANDELER E., HERRMANN L., UND STRECK T. 2012. *Bodenkunde und Standortlehre*. 2. Auflage. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- STARCK N. 2011. Die Flocken vielen wie riesige Vögel vom Himmel. *Tessiner Zeitung* Feb 2011.
- THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES' UNESCO WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY. 1990. A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 41: 5–12.
- TRALLI D. M., BLOM R. G., ZLOTNICKI V., DONNELLAN A., UND EVANS D. L. 2005. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59: 185–198.
- VARNES D. J. 1978. *Slope Movement Types and Processes*. Chapter 2.
- WEISSERT H., UND STÖSSEL I. 2015. *Der Ozean im Gebirge: Eine geologische Zeitreise durch die Schweiz*.

Digitale Kartenportale

GOOGLE EARTH: Software (kostenfrei zum Herunterladen), die einen virtuellen Globus darstellt.

SWISSTOPO-KARTENPORTAL (MAP.GEO.ADMIN.CH): Landeskarten der Schweiz mit mehreren Massstäben, GeoCover Vektorkarte, Luftbilder (LUBIS-viewer) etc. 2D bis 2.5D-Visualisierungsmöglichkeiten (<http://map.geo.admin.ch/>).

BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU): Gewässerschutzkarte Schweiz (<http://map.geo.admin.ch/>)

Kanton Tessin

SUPSI – scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (<http://www.supsi.ch/home.html>)

DIPARTIMENTO DEL TERRITORIO BELLINZONA (<https://www4.ti.ch/dt/dipartimento/>)

9 Anhang

9.1 Oxide

Profil	Horizont	Oxide (%)									
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
1	Ah	16.0	56	0.9	2.0	3.6	2.3	4.0	0.12	0.3	0.6
	Bw	17.9	57	0.9	2.4	3.9	2.3	4.5	0.04	0.1	0.6
	BC	16.9	59	0.9	2.4	3.9	2.3	4.5	0.10	0.1	0.6
	schwarze Schicht	7.2	18	1.9	1.1	1.5	2.4	22.1	13.89	0.4	0.3
2	Ah	18.8	52	0.8	2.8	3.1	2.0	6.7	0.12	0.2	0.9
	2Bs1	17.0	55	0.8	2.6	3.7	1.9	5.7	0.19	0.1	0.8
	2Bs2	17.2	58	0.8	3.1	4.6	2.2	5.4	0.09	0.1	0.8
	2Bs3	17.4	54	1.0	2.9	3.3	2.0	6.0	0.15	0.2	0.8
3	Ah1	13.9	58	1.8	2.4	3.4	2.5	4.8	0.08	0.2	0.6
	Ah2	15.2	54	1.5	2.4	2.7	2.2	5.7	0.06	0.1	0.7
	Bw	16.8	52	1.2	3.1	2.6	2.1	6.2	0.06	0.2	0.8
	C	15.9	59	1.9	3.2	2.5	2.4	5.8	0.08	0.2	0.9
4	Ah	17.0	54	1.5	3.0	2.7	2.2	6.0	0.07	0.2	0.8
	C2	15.2	70	0.1	1.2	5.7	1.6	2.6	0.16	0.1	0.2
5	Ah	15.8	49	1.3	3.1	2.6	1.9	6.3	0.11	0.4	0.8
	Bw	16.6	48	1.1	3.1	2.7	1.8	6.7	0.10	0.4	0.8
	IIBs	17.3	49	1.2	2.9	2.8	2.1	6.5	0.07	0.4	0.8
6	Ah2	15.8	44	0.8	3.1	3.6	2.4	7.7	0.04	0.3	0.8
7	Ah1	13.7	39	1.8	2.9	2.2	1.9	6.3	0.18	0.3	0.8
	Ah2	17.3	47	1.3	3.5	2.7	1.9	7.5	0.09	0.2	1.0
	Bw	18.0	49	1.2	3.9	2.9	2.1	7.5	0.08	0.1	0.9
	C	17.5	52	1.9	5.7	2.7	2.2	7.1	0.07	0.2	0.8

9.2 Chemische und physikalische Parameter der sieben Bodenprofile

	Tiefe [cm]	Mittlere Tiefe [cm]	Gesamtgewicht [g]	Skeletgehalt [%]	pH	C _{tot} [g/kg]	N _{tot} [g/kg]	C/N-Verhältnis
Profil 1								
Ah	0-50	25	553.1	54.3	5	41.31	4.461	9.3
Bw	50-80	65	524.4	46.6	5.1	7.228	1.202	6
BC	80-110	95	556.7	46.6	5.1	2.08	0.774	2.7
schwarze Schicht	110-180	145	280.9	0.7	6.2	7.605	1.465	5.2
Profil 2								
Ah	0-70	35	331.3	38.8	4.4	20.98	1.511	16.2
2Bs1	70-100	85	368.8	22.2	4.8	7.327	0.452	8.7
2Bs2	100-120	110	297.4	20.3	4.6	8.162	0.939	0.7
2Bs3	120-200	160	368.7	13.5	4.6	0.566	0.784	13.9
Profil 3								
Ah1	0-50	25	662.5	61.6	4.1	26.88	1.858	14.5
Ah2	50-70	60	702.8	33.3	4.3	27.33	1.739	15.7
Bw	70-90	80	699.2	40.2	4.6	10.71	0.063	170
C	90-120	105	977.2	43	4.8	3.764	0.954	3.9
Profil 4								
Ah	0-30	15	574.3	30.3	4.6	15.48	1.35	11.5
C2	110-113	111.5	444.2	61.6	4.3	0	0	0
Profil 5								
Ah	0-30	15	361.6	34.7	4.8	38.81	2.934	13.2
Bw	30-50	40	298.8	21.9	4.9	31.47	3.238	9.7
2Bs	50-70	60	313.8	46.8	4.9	19.41	1.374	14.1
Profil 6								
Ah2	25-30	27.5	518.3	46.9	3.5	42.66	2.285	18.7
Profil 7								
Ah1	0-10	5	357.5	23.1	4.8	91.13	5.425	16.8
Ah2	Okt 50	30	498.7	21.9	4.4	32.41	2.429	13.3
Bw	50-70	60	553.4	22.9	4.5	15.06	1.282	11.7
C	70-110	90	598.3	18.3	4.5	4.666	0.464	10.1

9.3 Metadaten vergangene Ereignisse 1951-2016 (punktuell erfasst)

DATA_EVENT	ANNO_EVENT	TIPO	NOME_COMUN	LOCALITA
<Null>	<Null>	frana / scivolamento	<Null>	<Null>
<Null>	<Null>	frana / scivolamento	<Null>	<Null>
2/14/1951	1951	valanga	Faido-Cavagnago	Pizzo Cavagnago - Foppascia - Cavagnago
2/14/1951	1951	valanga	Faido-Cavagnago	Pizzo Cavagnago - Foppascia - Cavagnago
8/10/1954	1954	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Anzonico	Ri di Lalum
11/22/1974	1974	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)
4/6/1975	1975	valanga	Giornico	Alpe di Fopp - ex Monteforno
4/6/1975	1975	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Alto
4/6/1975	1975	valanga	Giornico	Alpe di Fopp - ex Monteforno
4/6/1975	1975	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Alto
<Null>	<Null>	valanga	<Null>	<Null>
2/11/1977	1977	valanga	Faido-Anzonico	Rive di Casletto, Angone
8/17/1977	1977	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Traversa - Valle della Buzza
4/7/1983	1983	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)
5/25/1983	1983	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Anzonico	Ruinela
5/25/1983	1983	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	strada forestale per i monti di Deiro
5/25/1983	1983	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Traversa
2/11/1986	1986	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Erra, Traversa
7/17/1987	1987	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Sassi Grossi
2/11/1990	1990	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Casletto
2/11/1990	1990	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Casletto
10/9/1993	1993	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)
8/16/1993	1993	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Catto
8/16/1993	1993	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Catto
10/11/1993	1993	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Marone - Usc
10/8/1993	1993	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Fraggio (Freddo)
10/15/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Ruinela - Ri di Lalum
10/12/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina
10/17/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Ri Puledro
10/1/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Traversa - sotto Singiasco
1/4/1994	1994	valanga	Faido-Anzonico	Rive di Casletto
10/1/1995	1995	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Traversa - sotto Vignarengo
1/1/1996	1996	valanga	Faido-Cavagnago	Foppascia
1/1/1996	1996	valanga	Faido-Cavagnago	Foppascia
6/28/1997	1997	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Faura
<Null>	<Null>	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina
5/1/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Singiasco
6/24/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Frecc/Biocci
7/6/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Grocc
9/28/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Ri di Suaisa
11/6/2000	2000	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Ri di Balma - Ri Galett
11/15/2000	2000	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina
11/26/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Faura di Cavagnago
11/15/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Piano della Cascina
11/29/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Piano della Cascina
1/8/2003	2003	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Ri Secco
2/25/2003	2003	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Altirolo
8/29/2003	2003	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Valle di Ronco - Mornda
8/29/2003	2003	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Dragone
11/20/2004	2004	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Traversa

9.4 Metadaten vergangene Ereignisse 1951-2016 (flächenhaft erfasst)

DATA_EVENT	ANNO_EVENT	TIPO	NOME_COMUN	LOCALITA	Shape_Length	Shape_Area
8/10/1954	1954	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Anzonico	Ri di Laiium	2576.915996	27849.436274
11/22/1974	1974	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)	403.237298	863.890781
8/17/1977	1977	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Traversa - Valle della Buzza	1597.891575	25813.571153
2/1/1977	1977	valanga	Faido-Anzonico	Rive di Casletto, Angone	2815.575606	129163.549426
4/7/1983	1983	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)	403.237258	863.890781
5/25/1983	1983	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Anzonico	Ruinela	1955.952413	32536.298421
5/25/1983	1983	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Traversa	1158.318075	69470.209078
5/25/1983	1983	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	strada forestale per i monti di Deiro	326.095693	5576.972215
2/1/1986	1986	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Erra, Traversa	7199.950199	254472.166888
7/17/1987	1987	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Sassi Grossi	526.785726	7195.072578
10/9/1993	1993	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Fraggio (Freddo)	403.237258	863.890781
10/11/1993	1993	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Marone - Usc	3908.803693	17661.230415
10/8/1993	1993	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Fraggio (Freddo)	483.043269	10026.020098
10/1/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Traversa - sotto Singiasco	4372.820542	24696.049238
10/15/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Traversa - Ri di Laiium	647.172833	20053.755668
10/12/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina	606.519076	19387.623188
10/17/1993	1993	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Ri Puledro	557.233896	6194.17477
1/4/1994	1994	valanga	Faido-Anzonico	Rive di Casletto	2826.467022	122030.099792
10/1/1995	1995	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Traversa - sotto Vignarengo	350.848563	4444.780671
6/28/1997	1997	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Faura	208.767152	2229.63536
<Null>	1998	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina	115.489086	1025.228657
6/24/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Frecc/Biocci	814.598235	10038.138593
5/1/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Singiasco	258.081635	3080.055035
7/6/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Grocc	258.167436	3062.840471
9/28/1999	1999	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Ri di Suaisa	250.714934	2927.408698
11/6/2000	2000	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Ri di Balma - Ri Galett	503.186606	6834.191692
11/15/2000	2000	colata di detrito / alluvionamento	Faido-Cavagnago	Plan della Cascina	321.144662	5747.223989
11/15/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Piano della Cascina	404.209287	6302.553905
11/29/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Piano della Cascina	279.898488	4788.912412
11/26/2002	2002	frana / scivolamento	Faido-Cavagnago	Faura di Cavagnago	245.727595	3557.351634
2/25/2003	2003	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Altirolo	224.523103	1260.129002
1/8/2003	2003	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Ri Secco	68.766373	316.84625
8/29/2003	2003	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Valle di Ronco - Monda	3290.597775	39700.25861
8/29/2003	2003	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Dragone	2559.578914	26196.026564
5/3/2004	2004	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Ri Tomp	285.702163	3578.429719
11/20/2004	2004	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Traversa	104.558054	770.694228
8/20/2004	2004	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Marlenca	123.117849	398.311144
7/18/2005	2005	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Anzonico	Ruina	754.539725	10520.930473
1/31/2005	2005	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Teleferica - Gerre della Cramosina	547.165224	3094.957874
<Null>	2005	caduta sassi / crollo di roccia	Faido-Cavagnago	Faura di Cavagnago	175.97355	1814.074859
6/18/2007	2007	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Dragonasch	1071.634	3065.79203
7/7/2007	2007	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Paroldino	554.775662	1168.524814
9/6/2008	2008	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Sacco - Fouda	362.306077	2735.805619
3/17/2008	2008	caduta sassi / crollo di roccia	Giornico	Ri Frecc	299.074357	713.685272
9/7/2008	2008	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	Paroldino Sud	1399.740235	8747.808973
9/7/2008	2008	colata di detrito / alluvionamento	Giornico	zona Catto	1416.970424	7620.38135
9/7/2008	2008	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	sopra nucleo	203.419965	2001.291982
9/7/2008	2008	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Ruina	298.88789	1030.995918
9/7/2008	2008	frana / scivolamento	Faido-Anzonico	Piantorn	177.201068	547.404544
<Null>	2009	valanga	Faido-Anzonico	Pizzo Alto	2229.475377	193192.117905

Persönliche Erklärung

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

Andrea Maria Strub

Bonaduz, 28. Juli 2017