

Langzeitliches Verhalten von Schwermetallen der Minenabfälle beim Mont Chemin und im Val de Bagnes (VS)

Masterarbeit GEO 511 in der Abteilung Geochronologie



Vorgelegt am 24. September 2015
von Annelies Berger | 09-105-602

Geographisches Institut - Irchel
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich

Fakultätsvertretung

Prof. Dr. Markus Egli

Betreuung

Prof. Dr. Markus Egli, markus.egli@uzh.ch
UZH Universität Zürich
Geographisches Institut, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

Dr. Rainer Kündig, rainer.kuendig@erdw.ethz.ch
ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Departement Erdwissenschaften, Sonneggstrasse 5, CH-8092 Zürich

Prof. Dr. Rolf Krebs, rolf.krebs@zhaw.ch
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Life Sciences und Facility Management, Schloss, CH-3820 Wädenswil

Vorwort und Dank

Die Thematik über belastete Minenstandorte in Bezug auf den historischen Bergbau der Schweiz übte schon zu Beginn meiner Nachforschungen eine Faszination auf mich aus. Die empirische Vorgehensweise ermöglichte es mir, im Rahmen der Feld- und Laborarbeit sowie in der kartographischen Darstellung der Daten diverse Erfahrungen zu sammeln. Dabei gestalteten sich die Untersuchungen dank der Verbindung von Theorie und Praxis sehr vielseitig und abwechslungsreich. Des Weiteren befindet sich die Arbeit an der Schnittstelle zwischen den Forschungsgebieten der Geochronologie, Pedologie und Geologie, was eine interdisziplinäre Herangehensweise zur Beantwortung der Fragestellung erlaubte. Dabei lernte ich Prozesse und Interaktionen zwischen den verschiedenen Disziplinen zu verstehen und miteinander zu verknüpfen. Nicht zuletzt erwarb ich wertvolle Kenntnisse über die Methoden der Geochronologie und Bodenkunde.

Hiermit möchte ich all jenen meinen herzlichen Dank aussprechen, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Markus Egli, der als Betreuer und Fakultätsvertreter stets mit Anregungen und Ratschlägen mir zur Seite stand. Weiter bedanke ich mich bei meinen Betreuern Prof. Dr. Rolf Krebs und Dr. Rainer Kündig. Ihnen habe ich zu verdanken, dass ich die Labor- und Forschungsarbeit an der ZHAW in Wädenswil sowie an der ETH Zürich realisieren konnte. Dabei gilt ein spezieller Dank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission SGTk, welche sehr hilfsbereit und entgegenkommend die Nutzung ihrer Datenbank ermöglichten.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Roger Widmer bedanken, welcher als Bergbauhistoriker der SGTk mich mit seinem umfangreichen Wissen über die historischen Lagerstätten und Vorkommen der Schweiz unterstützte. Er lehrte mich bei diversen Feldbegehungen die durch den Bergbau anthropogen veränderte Landschaft zu lesen und zu interpretieren.

Bei Roman Berger und Manuela Bächtold bedanke ich mich für die tatkräftige und enthusiastische Unterstützung bei der Feldarbeit.

Stefan Ansermet bin ich sehr dankbar für die detaillierten Auskünfte und Informationen über die Bergbaugeschichte beim Mont Chemin.

Ein grosser Dank geht an Josiane Kleiner und Monique Berger, die mit viel Engagement und Sorgfalt grammatikalische und sprachliche Korrekturen anbrachten.

Zum Schluss möchte ich ganz herzlich meinen Eltern Charles und Katharina Berger-Schneider danken, welche mir die akademische Ausbildung ermöglicht haben und mich auf meinem Weg stets unterstützen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit wurde in der Abteilung Geochronologie am Geographischen Institut der Universität Zürich verfasst. Im Fokus der Arbeit steht die Untersuchung der langzeitlichen Entwicklung und der Mineraltransformationen von Schwermetallen der Minenabfälle beim Mont Chemin südlich von Martigny und im Val de Bagnes (VS). Dazu dienen historische Belege über die Bergbautätigkeit als Basis für die zeitliche Einordnung der untersuchten Standorte. Weiter sollen die Zeiträume aufgezeigt werden, in denen eine Schwermetallbelastung wirkt und ein Schadstoffaustrag in die Umwelt erfolgt. In einer gesamtschweizerischen Perspektive gilt es, die Erkenntnisse über die zeitliche Entwicklung der Schwermetalle auf andere Standorte mit ähnlichen Bedingungen wie im Untersuchungsgebiet zu übertragen.

Insgesamt sind elf Bodenprofile auf Schutthalden ehemaliger Minenstandorte angelegt und dokumentiert worden. Nebst der Bestimmung der gängigen Bodenparameter ist von jedem Horizont eine Probe-Entnahme zur Laboruntersuchung erfolgt. Letztere beinhaltet die pH-Wert-Messung, die CHN-Analyse sowie die XRF Röntgenfluoreszenzanalyse und XRD Röntgendiffraktometrie. Zudem lässt das Vorhandensein von Holzkohle beim Profil 3 (Goilly) eine ^{14}C -Datierung zu. Diese gewährleistet die zeitliche Einordnung des Standorts, da hier nur wenige Literaturangaben über die Abbautätigkeit existieren. Weiter dienen die XRF-Resultate als Basis zur Berechnung der langzeitlichen Verwitterungsindices und der Massenbilanz.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mehrheit der Profile im sauren bis schwach sauren Bereich liegt, womit eine potentielle Mobilisierung der Schwermetalle gegeben ist. Mithilfe der CHN-Analyse wird erwartungsgemäss eine Abnahme des organischen Kohlenstoffs mit der Tiefe sichtbar. Jedoch kann anhand des C/N-Verhältnisses die Verfügbarkeit von Stickstoff nicht analysiert werden, da bei der Messung die Detektionsgrenze für organischen Kohlenstoff erreicht worden ist. Dies ist nebst umweltbedingten Einflüssen auch der Grund dafür, weshalb sich der $\text{SOC}_{\text{Stock}}$ nicht eignet um eine langzeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoff-Vorrats zu untersuchen. Mit der XRD-Methode können bei zwei Standorten Anglesit oder Cerussit festgestellt werden, welches Sekundärmineralien von Galenit (Bleiglanz) sind (Bishop et al. 1977). Deren Bildung weist auf eine fortgeschrittene Mineraltransformation hin, was zu einer natürlichen Immobilisierung und geringeren Reaktivität des Bleis führt. Des Weiteren kann die Holzkohle beim Standort Goilly auf 976-1017 J. n. Chr. datiert werden. Dies ergibt bezüglich dem Beprobungszeitpunkt im Jahr 2014 ein durchschnittliches Bodenalter von 1018 Jahren. Anhand der Altersangaben der letzten Abbautätigkeit lassen sich mit den XRF-Resultaten langzeitliche Verwitterungsindices berechnen. Diese zeigen mit Zunahme des Bodenalters eine stärkere Verwitterung des Oberbodens auf. Der Ansatz der Massenbilanz eignet sich für die Untersuchung von Schutthalden nur bedingt. Dieser setzt ein homogenes Ausgangsmaterial voraus, was bei Schutthalden-Ablagerungen kaum gegeben ist. Für das Bodenskelett zeigt sich in der Massenbilanz dennoch ein Trend des relativen Austrags der Elemente mit der Zeit.

Die Reaktivität von Blei und Kupfer wird anhand der Trends der Verwitterungsindices für Standorte, welche älter als 400 Jahre sind, als „schwach reaktiv“ eingestuft. Dabei wird darauf hingewiesen, dass auch schwach reaktive Sekundärmineralien durch chemische Reaktionen remobilisiert werden können. Wird dies berücksichtigt, muss auch längerfristig mit einer Schadstoffbelastung gerechnet werden. Weiter können Schutthalden mit einem Bodenalter von weniger als 400 Jahren in Klassen wie „stark reaktiv“ bis „mittel reaktiv“ eingeteilt werden. Diese Erkenntnisse lassen sich unter Vorbehalt auf andere Standorte der Schweiz mit gleichen Bedingungen übertragen und kartographisch darstellen. Dabei erweist sich die Datenbank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission SGK als umfangreiche und wertvolle Wissensquelle über die historischen Lagerstätten und Vorkommen der Schweiz. Ferner können mehrere Minenstandorte ausgewiesen werden, welche sich in Grundwasserschutz-zonen befinden. Da hier ein Gefährdungspotential in Bezug auf die Trinkwasserversorgung besteht, wird ein langfristiges Monitoring der Grundwasserqualität empfohlen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	I
Zusammenfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungen	IX
Glossar.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Fragestellung.....	2
2 Untersuchungsgebiet	3
2.1 Geographische Lage	3
2.2 Geologisch-tektonischer Überblick	3
2.3 Klima und Vegetation	4
3 Methoden.....	5
3.1 Standortwahl	5
3.2 Feldarbeit	7
3.2.1 Mobiles XRF-Gerät.....	7
3.2.2 Bodenprofil.....	7
3.3 Laborarbeit	8
3.3.1 Trocknung, Bestimmung der Lagerungsdichte, Sieben und Mahlen	8
3.3.2 pH-Wert Messung	8
3.3.3 CHN-Analyse.....	8
3.3.4 XRF Röntgenfluoreszenzanalyse.....	9
3.3.5 XRD Röntgendiffraktometrie	9
3.3.6 Radiokarbonmethode.....	10
3.4 Berechnung langzeitlicher Verwitterungsraten	11
3.4.1 Verwitterungsindices.....	11
3.4.2 Massenbilanz.....	12
3.4.3 Kohlenstoff-Vorrat.....	12
3.5 Recherche und kartographische Darstellung	13
3.5.1 Datenbank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission SGTk	13
3.5.2 Datenaufbereitung und -darstellung.....	13
4 Ergebnisse	14

4.1	Zeitliche Einordnung der Profile	14
4.1.1	Chez Larze I & III	14
4.1.2	Goilly	14
4.1.3	La Crettaz	14
4.1.4	Couloir Collaud III	14
4.1.5	Grands Esserts	15
4.1.6	Les Trappistes	15
4.1.7	Peiloz	15
4.2	Feldarbeit	17
4.2.1	Profil 1: Chez Larze III-1	17
4.2.2	Profil 2: Chez Larze III-2	18
4.2.3	Profil 3: Goilly	19
4.2.4	Profil 4: La Crettaz-1	20
4.2.5	Profil 5: Couloir Collaud III	21
4.2.6	Profil 6: Chez Larze I	22
4.2.7	Profil 7: La Crettaz-2	23
4.2.8	Profil 8: Grands Esserts	24
4.2.9	Profil 9: Les Trappistes	25
4.2.10	Profil 10: Peiloz-1	26
4.2.11	Profil 11: Peiloz-2	27
4.3	Laborresultate	28
4.3.1	Bodeneigenschaften	28
4.3.2	pH Messung	29
4.3.3	CHN-Analyse	30
4.3.4	XRF Röntgenfluoreszenzanalyse	30
4.3.5	XRD Röntgendiffraktometrie	30
4.3.6	¹⁴ C-Datierung	33
4.4	Berechnung langzeitlicher Verwitterungsraten	34
4.4.1	Verwitterungsindices	34
4.4.2	Massenbilanz	36
4.4.3	Kohlenstoffvorrat	37
4.5	Reaktivität	38
4.5.1	Reaktivität der Schweizer Minenstandorte	38
4.5.2	Reaktivität der Minenstandorte bei Grundwasserschutzzonen und -arealen	40
5	Diskussion	43

5.1	pH- und CHN-Analyse	43
5.2	XRD-Analyse	44
5.2.1	Chez Larze	44
5.2.2	Goilly, Couloir Collaud III und Grands Esserts	44
5.2.3	La Crettaz und Les Trappistes	44
5.2.4	Peiloz	45
5.3	¹⁴ C-Datierung	45
5.4	Verwitterungsindices	46
5.5	Massenbilanz	46
5.6	Kohlenstoff-Vorrat	47
5.7	Reaktivität	47
5.7.1	Reaktivität der Schweizer Minenstandorte	47
5.7.2	Reaktivität der Minenstandorte bei Grundwasserschutzzonen und –arealen	48
6	Schlussfolgerung	50
	Quellenverzeichnis	52
	Anhang 1: Profilstandorte Peiloz-1 und Peiloz-2	55
	Anhang 2: XRF-Resultate des Bodenmaterials	56
	Anhang 3: XRF-Resultate des Skeletts	60
	Anhang 4: XRD-Resultate	64
	Anhang 5: Element-Ratio Ti, Zr und V	66
	Anhang 6: Grundwasserschutz	67
	Persönliche Erklärung	69

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Der Mont Chemin mit den umgebenden Ortschaften Martigny, Sembrancher und Vollège (Swisstopo 2007).....	2
Abb. 2	Klimadiagramm von Fey (VS) 1961-1990 (Meteo Schweiz 2014).....	3
Abb. 3	Topographische und geologische Übersicht zum Untersuchungsgebiet beim Mont Chemin (verändert, nach Swisstopo 2007 und Swisstopo 2013b).....	5
Abb. 4	Mobiles XRF-Gerät (Foto: A. Berger).....	7
Abb. 5	Löslichkeit von Metallsulfiden und -oxiden in Abhängigkeit des pH-Werts (Ghassemi et al. 1981)	8
Abb. 6	Röntgendiffraktometrie mit dem Gerät Bruker-AXS (Foto: A. Berger).....	9
Abb. 7	Probenaufbereitung für die XRD-Analyse (Foto: A. Berger)	10
Abb. 8	Merowinger-Schlacke bei Goilly (Foto: A. Berger).....	14
Abb. 9	Profilfoto und Bodenparameter bei Chez Larze III-1 (Foto: A. Berger).....	17
Abb. 10	Stolleneingang Chez Larze III (Foto: A. Berger).....	17
Abb. 11	Profilfoto und Bodenparameter bei Chez Larze III-2 (Foto: A. Berger).....	18
Abb. 12	Aufschüttung bei der Mine Chez Larze III mit Profil 2 (Foto: A. Berger).....	18
Abb. 13	Profilfoto und Bodenparameter bei Goilly (Foto: A. Berger).....	19
Abb. 14	Anthropogener gebildeter Graben beim Standort Goilly (Foto: A. Berger).....	19
Abb. 15	Profilbild und Bodenparameter bei La Crettaz-1 (Foto: A. Berger)	20
Abb. 16	Profilfoto und Bodenparameter bei Couloir Collaud III (Foto: A. Berger)	21
Abb. 17	Schutthalde bei Couloir Collaud III mit Profil 6 (Foto: A. Berger)	21
Abb. 18	Profilfoto und Bodenparameter bei Chez Larze I (Foto: A. Berger).....	22
Abb. 19	Erythrin im Stollen von Chez Larze I (Foto: A. Berger).....	22
Abb. 20	Profilfoto und Bodenparameter bei La Crettaz-2 (Foto: A. Berger).....	23
Abb. 21	Galenit-Fundstück aus dem Profil 7 bei Chez Larze (Foto: A. Berger)	23
Abb. 22	Profilfoto und Bodenparameter bei Grands Esserts (Foto: A. Berger)	24
Abb. 23	Azurit (blau) und Malachit (türkis) von Grands Esserts (Foto: A. Berger).....	24
Abb. 24	Profilfoto und Bodenparameter bei Les Trappistes (Foto: A. Berger)	25
Abb. 25	Galenit- und Fluorit-Gesteinsproben von Les Trappistes (Foto: A. Berger).....	25
Abb. 26	Profilfoto und Bodenparameter bei Peiloz-1 (Foto: A. Berger)	26
Abb. 27	Verwittertes Galenit-Bruchstück von Peiloz-1 (Foto: R. Widmer)	26
Abb. 28	Profilfoto und Bodenparameter bei Peiloz-2 (Foto: A. Berger)	27
Abb. 29	pH-Werte (CaCl ₂) in Zusammenhang mit der Profiltiefe.....	29
Abb. 30	pH-Wert des Bodens als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.	29
Abb. 31	Organischer Kohlenstoff in Zusammenhang mit der Profiltiefe	30

Abb. 32	XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden γ BA mit dem Ausgangsgestein bBC von Profil 1 Chez Larze III-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Az = Azurit, Flu = Fluorit, Ma = Magnetit)	31
Abb. 33	XRD-Diffraktogramm: γ A-Horizont von Profil 4 und γ C-Horizont von Profil 7 bei La Crettaz (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Cer = Cerussit, Alb = Albit, Flu = Fluorit)	32
Abb. 34	XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden I γ A mit dem Ausgangsgestein γ C von Profil 10 Peiloz-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, An = Anglesit)	33
Abb. 35	(K+Ca)/Ti - Index für die Feinerde des Oberbodens	34
Abb. 36	Index B für die Feinerde des Oberbodens	34
Abb. 37	Weathering Index of Parker WIP für die Feinerde des Oberbodens	34
Abb. 38	Weathering Index of Parker WIP fürs Skelett des Oberbodens	34
Abb. 39	Base-Katione (Na, Mg, Ca, K), Chrom Cr, Cadmium Cd und Kupfer Cu relativ zu den immobil Elementen Ti, Zr, und V als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.....	35
Abb. 40	Der relative Massenverlust $\tau_{j,w}$ im verwitterten Skelett für die Base-Katione (Na, Mg, Ca, K), Blei Pb, Kobalt Co und Zink Zn in Abhängigkeit des Bodenalters. Der Trend ist dargestellt mit der Logarithmusfunktion.	36
Abb. 41	Organischer Kohlenstoffvorrat SOC_{org} in Abhängigkeit des Bodenalters	37
Abb. 42	Reaktivität von Blei bei historischen Minenstandorten der Schweiz (verändert, nach Swisstopo 2002)	39
Abb. 43	Reaktivität von Kupfer bei historischen Minenstandorten der Schweiz (verändert, nach Swisstopo 2002)	39
Abb. 44	Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Peiloz" (582'369/100'061) im Valle de Bagnes (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (verändert, nach Swisstopo WMS)	40
Abb. 45	Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Praz-Jean" (600'850/110'480) im Val d'Hérens (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)	41
Abb. 46	Minenstandorte auf silikatischem Untergrund im Kanton Wallis, lokalisiert inmitten oder in max. 50 m Reichweite zu Grundwasserschutzzonen und -arealen (verändert, nach Swisstopo WMS)	42
Abb. 47	Minenstandorte auf silikatischem Untergrund im Kanton Uri und Graubünden, lokalisiert inmitten oder in max. 50 m Reichweite zu Grundwasserschutzzonen und -arealen (verändert, nach Swisstopo WMS)	42
Abb. 48	Standorte der Profile 10 und 11 (Peiloz) bei Bruson im Val de Bagnes (verändert, nach Swisstopo 2007)	55
Abb. 49	XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden γ A mit dem Skelett von Profil 4 La Crettaz-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Cer = Cerussit)	64
Abb. 50	XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden γ Ah mit dem Ausgangsgestein γ (B)C von Profil 6 Chez Larze I (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Co = Cobaltit, Ca = Calcit, Ma = Magnetit)	64
Abb. 51	XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden γ Ah mit dem Ausgangsgestein γ C von Profil 8 Grands Esserts (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Ma = Magnetit)	65

Abb. 52	Molybdän Mo, Blei Pb, Mangan Mn und Wolfram W relativ zu den immobilen Elementen Ti, Zr, und V als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.	66
Abb. 53	Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Ravoire" (569'500/106'400) bei Martigny-Combe (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)	67
Abb. 54	Reaktivität von Blei bei den Minenstandorten „Le Fou" (587'190/108'325) und „Siviez, Grand Creux“ (588'540/109'580) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS).....	67
Abb. 55	Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Stuben" (694'275/178'125) in der Nähe von Gurtellen (UR) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS) ..	68
Abb. 56	Reaktivität von Kupfer beim Minenstandort "Puntaiglas" (716'850/180'565) im Val Punteglias (GR) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)....	68

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht über die Abbautätigkeit im Untersuchungsgebiet und geologische Voraussetzungen (verändert, nach Ansermet 2001 und Swisstopo 2013b)	6
Tab. 2	Übersicht verwendeter Verwitterungsindices	11
Tab. 3	Übersicht zu den allgemeinen Daten und zeitliche Einordnung der untersuchten Profile	16
Tab. 4	Physikalische und chemische Eigenschaften der Fraktion <2 mm der untersuchten Böden beim Mont Chemin (n. m. = nicht messbar)	28
Tab. 5	Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse beim Standort Chez Larze	31
Tab. 6	Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse der Standorte Goilly, Couloir Collaud und Grands Esserts.....	32
Tab. 7	Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse der Standorte La Crettaz und Les Trappistes.....	32
Tab. 8	Resultate der ¹⁴ C-Datierung von der Holzkohle bei Profil 3 Goilly.....	33
Tab. 9	Klassifizierung der Reaktivität von Blei und Kupfer unter Berücksichtigung der langzeitlichen Verwitterungsindices	38
Tab. 10	Resultate der XRF Röntgendiffraktometrie des Bodenmaterials.....	56
Tab. 11	Resultate der XRF Röntgendiffraktometrie des Skeletts	60

Abkürzungen

AltIV	Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten vom 26. August 1998, Stand am 1. März 2015 (Der Schweizerische Bundesrat 1998b)
SGTK	Schweizerische Geotechnische Kommission
SOC _{Stock}	Menge des organischen Kohlenstoffvorrats (kg/m ²) (engl. „ <i>Soil Organic Carbon Stock</i> “)
VBBö	Verordnung über Belastungen des Bodens, vom 1. Juli 1998, Stand am 1. Juni 2012 (Der Schweizerische Bundesrat 1998a)
WIP	engl. „ <i>Weathering Index of Parker</i> “ (Parker 1970)
XRD	Röntgendiffraktometrie (engl. „ <i>X-Ray Diffraction</i> “)
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse (engl. „ <i>X-Ray Fluorescence</i> “)

Glossar

Autochthon	Tektonische Position von Decken, wobei das Autochthon während der Alpenfaltung an Ort und Stelle verblieben ist und „(...) also noch auf seiner ursprünglichen kristallinen Unterlage [liegt]“ (Labhart 2007).
Grundwasserschutzareal	Geschützte Gebiete, „(...) die für die künftige Nutzung und Anreicherung von Grundwasservorkommen von Bedeutung sind“ (Swisstopo 2013a).
Grundwasserschutzzone	Geschützte Gebiete zum Schutz der Trinkwasserfassungen und zur Nutzung des Grundwassers als Trinkwasserquelle (Swisstopo 2013a).
mylonitisiert	Form der Metamorphose, wobei das Gestein durch den starken, gerichteten Druck metamorph überprägt und zu feinen Bruchstücken zerrieben wird (Ansermet 2001)
Protolith	Ausgangsgestein
Reaktivität	Zustand über das chemische Verhalten eines Stoffes, wobei infolge chemischer und diagenetischer Prozesse mit zunehmendem Bodenalter von einer sinkenden Reaktivität und somit von einer natürlichen Demobilisierung der Stoffe ausgegangen werden kann (Förstner & Grathwohl 2003).
Schwermetalle	Metalle, welche im Gegensatz zu Leichtmetallen eine Dichte grösser als 5 g/cm ³ aufweisen und durch ihre Toxizität bereits bei geringen Konzentrationen eine besondere Stellung im Zusammenhang mit Bodenbelastungen einnehmen (Scheffer et al. 2010).

1 Einleitung

Schon vor mehr als 1400 Jahren wurden beim Mont Chemin, südlich von Martigny, Metallerze abgebaut und verhüttet (Ansermet 2001). Während in den letzten Jahrhunderten diverse Minen und Stollen angelegt wurden und reger Betrieb am Mont Chemin herrschte, sind es heute lediglich noch Strahler, welche aktiv nach den begehrten Mineralien suchen. Denn obwohl in der Schweiz viele Fundorte von Bodenschätzen existieren, sind die Vorkommen von zu geringer Qualität und Quantität um abgebaut zu werden. Oft liegen sie in komplexen Erzen vor, während die Menge der Elemente zu klein ist, um einen Abbau rentabel zu betreiben. Die Redewendung „Die Schweiz ist reich an armen Minen“ beschreibt die Sachlage daher sehr treffend. Nicht zuletzt sind die Standorte im alpinen Gelände oft schwer zugänglich und kaum erreichbar, so dass heute kein Erzabbau mehr erfolgt. Auch wenn kein wirtschaftlicher Nutzen mehr besteht, ist der Mont Chemin dank der langen Abbaubautradition für Forschungszwecke von Interesse. Hier existieren diverse Minen mit zeitlich verschiedenen Abbauphasen, weshalb sich der Mont Chemin speziell als natürliches Labor eignet, um die zeitliche Entwicklung von Minenabfällen zu untersuchen.

1.1 Problemstellung

Zwar besteht beim Mont Chemin keine aktive Bergbautätigkeit mehr, doch hinterliessen die einstigen Mineure ein Erbe, welches bis heute auf die Umwelt einwirkt. Denn minderwertiges Gesteinsmaterial und Schlacken wurden meist vor Ort abgelagert, wodurch teils grossräumige Schutthalden entstanden. Damit führte der Erzabbau dazu, dass eine geogene Quelle von Schwermetallen durch die Förderung und Ablagerung an der Oberfläche in die Umwelt gebracht und der Verwitterung ausgesetzt wurde. Diese abgelagerten Schwermetalle sind besonders in saurem Milieu leicht mobilisierbar und bioverfügbar (Scheffer et al. 2010). So zeigen Studien von Egli et al. (2011), dass das Ausmass der Schwermetallbelastung beim Mont Chemin bis heute die vom Bund vorgegebenen Richtwerte zum Teil um ein Vielfaches übersteigen. Die im Jahr 1998 in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) festgelegten Grenzwerte gelten allerdings nur für urbane und landwirtschaftlich genutzte Flächen, während bei Waldstandorten keine gesetzlichen Richtlinien bestehen. Doch stellt eine Verunreinigung bei Waldflächen ebenfalls ein Umweltisiko dar, wenn beispielsweise Schwermetalle im Oberflächenwasser transportiert werden und über Pflanzen in die Nahrungskette gelangen. Ein besonderes Augenmerk gilt es auf die Grundwasserschutzgebiete zu richten, da hier ein direkter Zusammenhang zur Trinkwasserversorgung und somit zum Menschen besteht. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, solche vom Gesetz unberücksichtigte Standorte und deren Mineraltransformationen zu untersuchen, da sie ein Risikopotential für die Umwelt darstellen.

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Das Hauptziel der Arbeit besteht darin, das langzeitliche Verhalten von Schwermetallen bei Minenabfällen beim Mont Chemin und im Val de Bagnes (VS) zu untersuchen. Dies bedingt eine Recherche nach geeigneten historischen Belegen über die Bergbautätigkeit im Untersuchungsgebiet. Die Literaturangaben sollen als Informationsquellen dienen, um das Alter der Minenabfälle zeitlich einzuordnen und die abgebauten Elemente zu ermitteln. Weiter gilt es, die im Zuge der Verwitterung entstehenden Mineraltransformationen aufzuzeigen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen soll die Reaktivität der Schwermetalle abgeleitet werden. Ziel ist es dabei, die Zeiträume aufzudecken, in welchen eine Mineraltransformation wirkt und eine Schadstoffquelle Schwermetalle in den Umweltkreislauf abgibt.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es zu beurteilen, inwiefern die Ergebnisse, welche für den Mont Chemin gelten, auch auf andere Schweizer Standorte übertragbar sind. Die Datenbank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission soll hier als Grundlage zur Analyse dienen. Dabei gilt es, Minenstandorte mit ähnlichen Grundvoraussetzungen bezüglich geologischem Untergrund und abgebauten Elementen zu selektieren. Die in Frage kommenden Minen der Schweiz sollen auf ihre letzte Abbautätigkeit hin untersucht werden, um anhand des Alters der Ablagerung auf die Reaktivität ihrer Schwermetalle zurückzuschliessen. Ziel ist es, die gewonnenen Erkenntnisse in geeigneter Weise kartographisch darzustellen. Ferner sollen die Minenstandorte mit Grundwasserschutz-zonen und -arealen verglichen werden, um auf Standorte mit speziellem Risikopotential und Abklärungsbedarf hinweisen zu können.

Somit liegen der Masterarbeit die folgenden Fragestellungen zugrunde:

- Können anhand historischer Belege beim Mont Chemin eine zeitliche Entwicklung von Schwermetallen und die daraus resultierenden Mineraltransformationen aufgezeigt werden?
- Über welche Zeiträume geben Minenabfälle Schwermetalle in ein Ökosystem ab, respektive wie lange muss mit einer Schwermetallbelastung gerechnet werden?
- Inwiefern sind die gewonnenen Erkenntnisse über die zeitliche Entwicklung von Schwermetallen auf andere Standorte der Schweiz mit ähnlichen Bedingungen übertragbar?

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Geographische Lage

Beim Mont Chemin handelt es sich um einen südlich von Martigny auslaufenden Bergkamm, welcher im Norden durch das Rhonetal und im Süden durch den Fluss La Dranse begrenzt wird. Zwar existiert unter dem Namen „Mont Chemin“ in der topographischen Landeskarte der Schweiz keinen Eintrag. Allerdings ist diese Bezeichnung bei der umliegenden Bevölkerung seit Jahrhunderten bekannt und heute noch gängig (Ansermet 2001). Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, zieht der Kamm des Mont Chemins vom Dorf Chemin Dessus (1203 m ü. M.) über den Col des Planches (1411 m ü. M.), den Col du Tronc und den Col du Lein in nordöstlicher Richtung zum Pierre Avoi (2335 m ü. M.) hin.

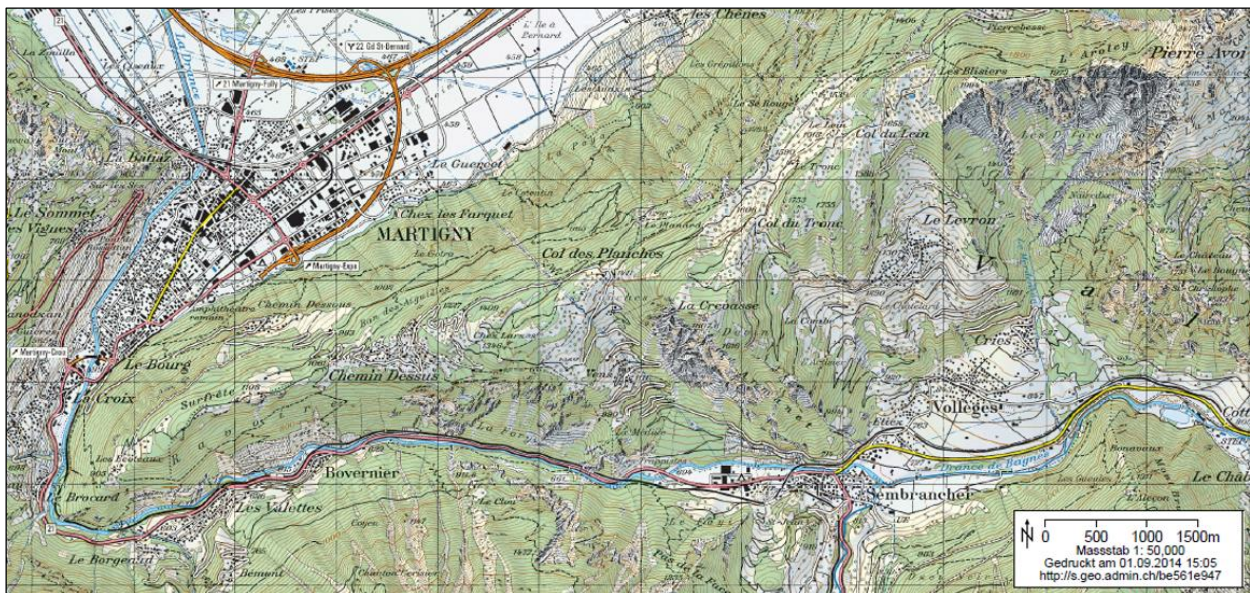


Abb. 1 Der Mont Chemin mit den umgebenden Ortschaften Martigny, Sembrancher und Vollège (Swisstopo 2007)

2.2 Geologisch-tektonischer Überblick

Tektonisch gehört der Mont Chemin westlich des Col des Planches zum Mont Blanc Massiv und östlich zum Helvetikum und Autochthon (Swisstopo 2013b). Für die vorliegende Arbeit liegt der Fokus auf dem westlichen, kristallinen Teil des Mont Chemins, welcher zum Mont Blanc Massiv gehört.

Dominiert wird die Geologie des Mont Blanc Massivs beim Mont Chemin von altkristallinen Schiefern und Gneisen, welche an den nördlichen und südlichen Hanglagen vorkommen (Swisstopo 2013b). Von zentraler Bedeutung für den Bergbau am Mont Chemin ist die Intrusion bei Tête des E conduits. Sie drang während der Variszischen Gebirgsbildung im Karbon vor 355-295 Mio. Jahren in die metamorphen Schiefer und Gneise ein und kristallisierte zu Granit aus (Labhart 2007). Dabei wurde das anstehende, altkristalline Gestein durch den starken, gerichteten Druck metamorph überprägt und zu feinen Bruchstücken zerrieben (mylonitisiert) (Ansermet 2001). Aus diesem Grund wird bei der Kontaktzone zur Intrusion von mylonitisierten Schiefern und Gneisen gesprochen. In diesem Bereich konnten in den Spalten des altkristallinen Gesteinskörpers magmatische Schmelzen eindringen und hydrothermale Fluide auskristallisieren. So entstanden einerseits Magmatit-Gesteinsgänge und andererseits hydrothermal gebildete Gänge aus Fluorit und Galenit mit Beimengungen von Silber, welche die Grundlage für die Bergbauaktivitäten beim Mont Chemin sind (Ansermet 2001). Ferner existieren Quarzporphyr-Gänge und Bänke von Marmor, welche wie die Granitintrusion vom Tête-des E conduits südwestlich in Richtung Dranse verlaufen (Swisstopo

2013b). Auf Kammhöhe sind ausserdem grössere Flächen mit Moränenmaterial der letzten Eiszeit überdeckt. Aufgrund dieser vielfältigen Geologie gilt der Mont Chemin als „mineralogisch eine der reichsten Lagerstätten der Schweiz“ (Gnägi & Labhart 2015).

Die Minen von Peiloz befinden sich in der tektonischen Einheit des Penninikums. Sie weisen als Geologie paleozoischen, albitischen Gneis der Grossen St. Bernhard-Decke auf (Swisstopo 2013b). Peiloz gilt als Blei-Zink-Lagerstätte, deren Abbau nach Silber schon während dem Mittelalter begonnen hat.

Eine geologische Karte des Untersuchungsgebiets beim Mont Chemin wird in Abb. 3 gezeigt.

2.3 Klima und Vegetation

Das Wallis ist durch das Alpengebirge vor atlantischen Westwindlagen und den Tiefdruckgebieten des Mittelmeers oftmals geschützt und weist deshalb ein eher trockenes Klima auf (Ansermet 2001). Erkennbar wird dies auch am Klimadiagramm von Fey (Abb. 2). Es zeigt eine fast halb so grosse Niederschlagssumme, wie zum Beispiel in Bern oder Zürich: Wird im Wallis zwischen 500-600 mm Niederschlag pro Jahr gemessen, sind es im Mittelland rund 1000 mm (Meteo Schweiz 2014). Besonders auf der steilen Südflanke, welche durch die Dranse begrenzt ist, weist der Mont Chemin durch die Südexposition besonders trockene Verhältnisse auf. Der nordexponierte Hang bei Chemin Dessous und auch die Bergkuppe ist weniger trocken, so dass Viehwirtschaft auf den wenigen Weideflächen betrieben werden kann. Der grösste Flächenanteil beim Mont Chemin besteht jedoch aus Nadelwald.

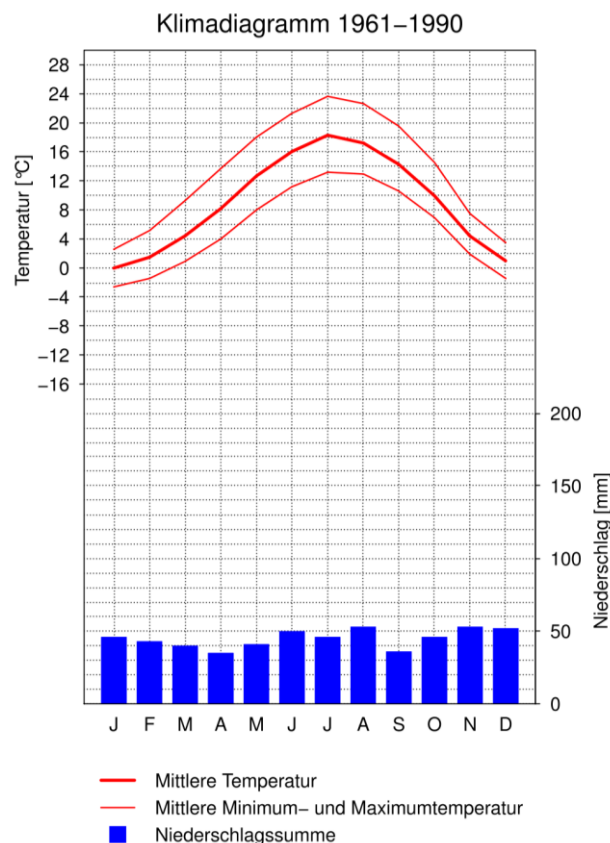


Abb. 2 Klimadiagramm von Fey (VS) 1961-1990 (Meteo Schweiz 2014)

3 Methoden

3.1 Standortwahl

Kriterien für die Wahl der zu untersuchenden Minenstandorte sind einerseits deren geologischen Voraussetzungen und andererseits die bereits vorhandenen Altersangaben der jeweiligen Abbauperioden.

Um die Proben später untereinander vergleichen zu können, sollen Minen basierend auf der ähnlichen geologischen Einheit betrachtet werden. Beim Mont Chemin befindet sich die Mehrzahl der Standorte in der Randzone der Intrusion, die den Granit des Mont Blanc Massivs zu Tage bringt. So liegt ein Fokus auf Eisenerzgängen, die in stark mylonitisierten Gneisen und kristallinen Schiefen liegen (Abb. 3). Dazu gehören die Minen bei Couloir Collaud unterhalb von Le Court und diejenigen zwischen Tête des Econduits und Col des Planches (Chez Larze, Goilly und Grands Esserts). Weiter werden Silber- und Bleiminen bei La Crettaz und Les Trappistes untersucht, wo hydrothermale Fluoritgänge mit Galenit existieren. Bei diesen Minen wurde während dem 18. und 19. Jh. das Blei des Galenits und das darin beigemengte Silber abgebaut, während im 20. Jh. der Fluorit im Zentrum der Exploration stand (Ansermet 2001).

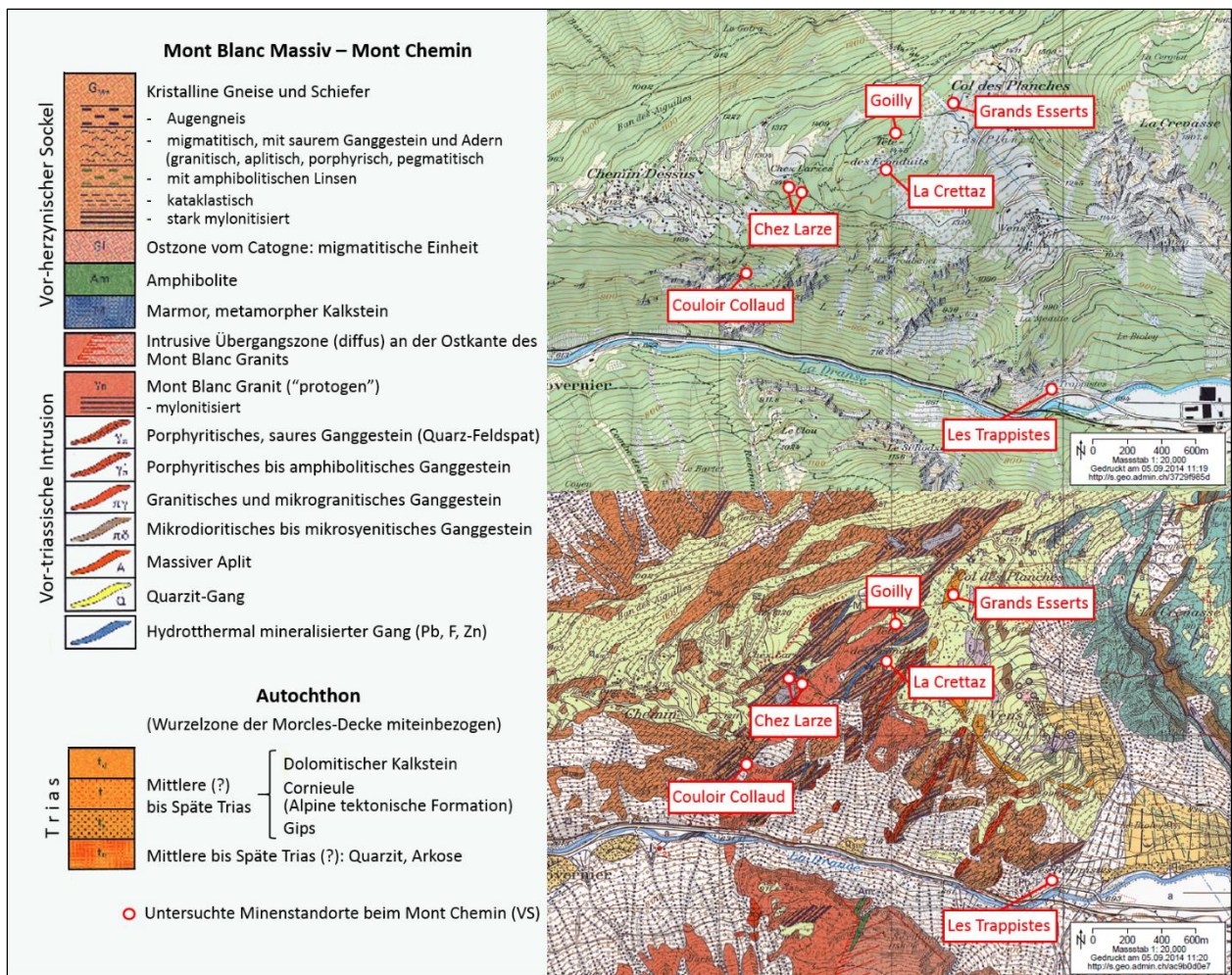


Abb. 3 Topographische und geologische Übersicht zum Untersuchungsgebiet beim Mont Chemin (verändert, nach Swisstopo 2007 und Swisstopo 2013b)

Hinzu kommen die Silberminen von Peiloz bei Bruson, welche sich zwar nicht im oben vorgestellten Untersuchungsgebiet, sondern im Val de Bagnes südöstlich des Mont Chemins befinden (Anhang 1). Dieser Standort wird zur Studie hinzugezogen, da er relativ alt und eine klare Zeitangabe der letzten Abbauphase bekannt ist.

Ein weiteres Kriterium zur Standortwahl ist die Verfügbarkeit der Literaturangaben über die Datierungen der Abbauphasen. Eine wichtige Informationsquelle dazu stellt das Buch „Le Mont Chemin“ von Stefan Ansermet (2001) dar, welches die Bergbautätigkeit im Untersuchungsgebiet umfassend beschreibt. Weitere Details über die Abbaugeschichte am Mont Chemin liefert auch die Dokumentation von Hugli et al. (1948). Die Bergbautätigkeiten bei Peiloz können mithilfe der Studie über die historische Silbergewinnung (Guénette-Beck et al. 2009) zeitlich eingeordnet werden. Eine chronologische Übersicht der Abbauperioden der untersuchten Standorte ist in Tabelle 1 ersichtlich. Die römischen Zahlen der Minennamen verweisen auf verschiedene Zugangstollen der Minen, da diese teils zu unterschiedlichen Zeiten angelegt wurden.

Tab. 1 Übersicht über die Abbautätigkeit im Untersuchungsgebiet und geologische Voraussetzungen (verändert, nach Ansermet 2001 und Swisstopo 2013b)

Abbauperiode	Minenbezeichnung	Abbaumaterial	Geologische Voraussetzungen
Merowinger-Epoche 556-669 J. n. Chr. und Frühmittelalter 500-1050 J. n. Chr.	Goilly	Eisenerz (Hämatit)	Hämatit in kristallinen Gneisen und Schiefen, Mont Blanc Massiv
Mittelalter bis 16. Jh.	Peiloz, Val de Bagnes	Blei und Silber (Galenit)	Albitischer Gneis mit Glimmer, Penninikum
Industrielle Revolution 1800-1875	Grands Esserts	Eisenerz (Magnetit)	Magnetit in kristallinen Gneisen und Schiefen, Mont Blanc Massiv
	Les Trappistes	Blei und Silber (Galenit)	Hydrothermale Gänge (Pb, F, Zn), Mont Blanc Massiv
	La Crettaz	Blei und Silber (Galenit)	Hydrothermale Gänge (Pb, F, Zn), Mont Blanc Massiv
	Chez Larze I und III	Eisenerz (Magnetit)	Magnetit in kristallinen Gneisen und Schiefen, Mont Blanc Massiv
Moderne 20. Jh.	Couloir Collaud III	Eisenerz (Magnetit)	Magnetit in kristallinen Gneisen und Schiefen, Mont Blanc Massiv
	Les Trappistes	Fluorit	Hydrothermale Gänge (Pb, F, Zn), Mont Blanc Massiv
	La Crettaz	Fluorit	Hydrothermale Gänge (Pb, F, Zn), Mont Blanc Massiv

3.2 Feldarbeit

3.2.1 Mobiles XRF-Gerät

Das mobile XRF-Gerät „NITON XL3t XRF Analyzer“ basiert auf energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF) und erzielt die Analyse der Elementzusammensetzung: Laut Hersteller können mit diesem Gerät mehr als 25 Elemente von Schwefel bis Uran gemessen werden. Dabei lassen sich Schwermetalle besonders gut nachweisen, da sie eine tiefe Detektionsgrenze besitzen (Beckhoff et al. 2006). Somit eignet sich die Methode nach Beckhoff et al. (2006) zur Untersuchungen von Minenabfällen und belastetem Material. Nicht zuletzt liegt der Vorteil des mobilen XRF-Geräts darin, dass die Materialien zerstörungsfrei und schnell analysiert werden können, was sich besonders bei Feldarbeit als praktisch erweist.

Mithilfe des mobilen XRF-Geräts „NITON XL3t XRF Analyzer“ der Fachhochschule Wädenswil (Abb. 4) werden bei der Feldbegehung die mit Schwermetall belasteten Standorte lokalisiert. Dazu wird vor Ort bis in 30 cm Bodentiefe Probematerial entnommen und in einem Plastikbeutel von Hand bestmöglich homogenisiert. Im Anschluss wird das XRF-Gerät für 30 Sekunden auf das leicht angepresste Material gedrückt, um den Schwermetallgehalt in der Probe zu messen.

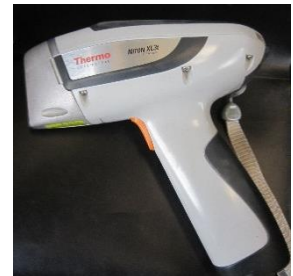


Abb. 4 Mobiles XRF-Gerät
(Foto: A. Berger)

3.2.2 Bodenprofil

An den Untersuchungsstandorten, wo die Messungen mit dem mobilen XRF-Gerät eine Schwermetallbelastung über dem Richtwert der VBBo (Der Schweizerische Bundesrat 1998a) zeigen, wird je ein Bodenprofil und eine Profilskizze erstellt. Für jeden Bodenhorizont gilt es, die gängigen Bodenparameter nach Kartieranleitung der ehemaligen Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL 1997) zu ermitteln. Entsprechend wird der pH-Wert mit der Hellige Indikatorlösung bestimmt und mittels der Munsell-Farbtabelle die Bodenfarbe beschrieben. Der Kalkgehalt kann mithilfe von verdünnter Salzsäure (10 % HCl) getestet werden. Dieser wird je nach Stärke des Aufbrausens durch die CO₂-Gas-Entwicklung entsprechend der Klassifizierung der FAL (1997) bestimmt. Dabei steht ein schwaches Aufbrausen für einen Karbonatgehalt von weniger als 2 %, während starkes Sprudeln auf einen Gehalt von mehr als 10 % hinweist. Ist ein Horizont besonders mächtig, wird dieser in mehreren Tiefen beprobt. Zur genauen Lokalisation der Profile gilt es, Koordinaten und Höhe mit dem GPS-Gerät aufzuzeichnen. Pro Horizont wird mindestens 0.5 bis 1 kg Probematerial zur Laboruntersuchung entnommen, wobei auch das entsprechende Bodenskelett nicht vernachlässigt wird.

3.3 Laborarbeit

3.3.1 Trocknung, Bestimmung der Lagerungsdichte, Sieben und Mahlen

Die frischen Bodenproben werden mindestens für einen Tag bei 60° Celsius im Ofen getrocknet. Im Anschluss wird von jedem Probenmaterial ein 100 cm³-Stechzylinder gefüllt, um anhand dessen Gewicht auf die Lagerungsdichte schliessen zu können. Diese ist definiert als das Gewicht der trockenen Probe relativ zum Gesamtvolumen (Scheffer et al. 2010). Weiter sind für die unten folgenden Methoden jeweils die gesiebten und gemahlten Feinfraktionen notwendig. Dafür werden alle Proben mit 2 mm Maschengrösse ausgesiebt und mit der Planetenmühle (Fritsch Pulverisette) gemahlen.

3.3.2 pH-Wert Messung

Nebst den äusseren, klimatischen Einflüssen wird das Stoffverhalten in der Bodenmatrix massgeblich von bodenphysikalischen- und chemischen Eigenschaften wie dem pH-Wert, Humusgehalt und dem Redoxpotential kontrolliert (Hirner et al. 2000). Im Zusammenhang mit Schwermetallen ist der pH-Wert von speziellem Interesse, da er mitbestimmt, in welcher Bindungsform ein Element vorliegt. Dabei gilt, je saurer der Boden ist, desto höher ist die Mobilität der Schwermetalle im Boden (Scheffer et al. 2010). Arsen bildet hier eine Ausnahme, da dessen Löslichkeit ab einem pH-Wert von >7 stark zunimmt (Scheffer et al. 2010). Die Abbildung 5 veranschaulicht die Löslichkeit für Metallsulfide und -oxide in Abhängigkeit vom pH-Wert (Ghassemi et al. 1981). Sie zeigt, dass bei einem pH-Wert zwischen 9 und 10 die meisten Metalloxide gering löslich sind, während die Löslichkeit mit abnehmendem pH-Wert stark steigt. Metallsulfide zeigen dabei eine geringere Löslichkeit wie die entsprechenden Oxide.

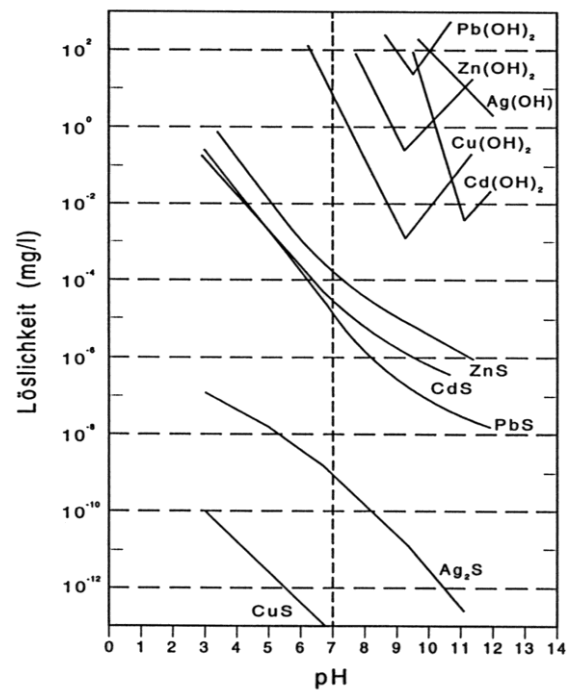


Abb. 5 Löslichkeit von Metallsulfiden und -oxiden in Abhängigkeit des pH-Werts (Ghassemi et al. 1981)

Die pH-Messeinrichtung wird zu Beginn anhand zweier Standardlösungen mit pH-Wert 4 und 7 kalibriert. Für die pH-Messung wird 5 g der feinkörnigen Probe (<2 mm Korndurchmesser) im Verhältnis 1:2.5 mit einer Calciumchlorid-Lösung (0.01 mol l⁻¹ CaCl₂) gemischt und während 20 min mit dem Magnetfisch gerührt. Nach dieser Aufbereitung wird mittels einer in die Lösung getauchten Glaselektrode der pH-Wert elektrometrisch gemessen.

3.3.3 CHN-Analyse

Mittels der Methode der CHN-Analyse wird die Ermittlung des totalen und organischen Kohlenstoffgehalts (C_{tot} und C_{org}) und des totalen Stickstoffgehalts (N_{tot}) der Proben in Gewichtsprozent erzielt. Zu Beginn der Analyse wird das Material im „CHN-Elemental Analyzer“ von atmosphärischen Gasen gesäubert und anschliessend für eine möglichst effiziente Verbrennung im Ofen mit Sauerstoff versetzt. Unter Standardtemperaturen von 550° Celsius für organisches Material und 950° Celsius für anorganisches Material werden die Proben erhitzt, bis sie unter Beigabe von Sauerstoff die jeweiligen Oxidierungsgase Kohlen-

stoffdioxid (CO₂), Stickoxide (NO_x) und Wasser (H₂O) abgeben. Mit einem non-dispersiven Infrarotdetektor misst das Gerät einerseits das CO₂ zur Quantifizierung von Kohlenstoff sowie den Wasserstoff in Form von H₂O. Zur Bestimmung von Stickstoff erfolgt ein zusätzlicher Schritt, indem Stickoxide (NO_x) zu elementarem Stickstoff (N₂) reduziert und in dieser Form von einer Wärmeleitfähigkeitsmesszelle gemessen werden kann. (ZHAW 2013)

Die CHN-Analyse erfolgt an der Fachhochschule Wädenswil mit dem Instrument „CHN-Elemental Analyzer“ von Leco. Zur Probenaufbereitung wird 0.1 g gemahlene Probenmaterial mit einer Zinnfolie zu einer Kapsel geformt. Für die zwei Verbrennungsphasen bei 550° Celsius und 950° Celsius werden von jedem Horizont je zwei Proben benötigt.

3.3.4 XRF Röntgenfluoreszenzanalyse

Mithilfe der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (ED-XRF) kann eine Bodenprobe auf ihre relative Menge und Zusammensetzung der Elemente hin bestimmt werden. Dazu wird mit Röntgenstrahlung das zu untersuchende Material bestrahlt. Infolgedessen werden die Elektronen verlangsamt und fallen aus einem atomkernnahen in ein entfernteres Orbital, wodurch das Atom in ionisierter Form zurückbleibt und die entstandene Lücke mit einem energetisch höherem Elektron ersetzt wird (Beckhoff et al. 2006). Infolge dieses Energieüberschusses geben die angeregten Atome elementspezifische, sichtbare Strahlung in Form von Fluoreszenz ab. Letztere misst das Detektionssystem und bestimmt so die Elementzusammensetzung der Probe. Der Einsatzbereich dieser Methode umfasst innerhalb des Periodensystems alle Elemente von Natrium bis Uran. Dabei eignet sich die Methode für die Messung von Schwermetallen besonders, da diese eine tiefe Nachweisgrenze besitzen (Beckhoff et al. 2006). Der Vorteil der Röntgenfluoreszenzanalyse gegenüber anderen Methoden ist, dass mit relativ geringem Aufwand präzise Messungen über die Elementzusammensetzung gewonnen und die Proben zudem nicht zerstört und wiederverwendet werden können.

Die Analytik mit dem XRF-Gerät (Xepos HE, Spectro ED-XRF) erfolgt im Labor der Universität Zürich. Von jeder Bodenprobe wird 5 g gemahlene, homogenes Material mit einer Korngrösse von <63 µm in Pulverform benötigt. Dieses wird in Plastik-Probenbehälter abgefüllt und über ein Ringsystem mit einer für Röntgenstrahlung durchlässigen Folie abgedichtet. Auf die alternative Probenaufbereitung der Pillenherstellung wird verzichtet, da bezüglich Genauigkeit die Pulvermessung den Anforderungen der Arbeit genügt.

3.3.5 XRD Röntgendiffraktometrie

Einige selektierte Proben werden anhand der XRD-Methode untersucht. Mit der Röntgendiffraktometrie wird qualitativ und halbquantitativ die kristalline Phase und deren relativen Gehalt in der gemahlene Proben untersucht. Hier macht man sich zu Nutze, dass die auftreffende Röntgenstrahlung auf ein kristallines Material, abhängig von dessen Kristallstruktur, mit einem spezifischen Winkel gebeugt und teilweise reflektiert wird (Beckhoff et al. 2006). Dabei entstehen an den verschiedenen Kristallgitterebenen in Abhängigkeit vom Winkel der auftreffenden Strahlung mehrere Reflexionssignale (Beckhoff et al. 2006). Der Detektor misst deren Intensität und zeichnet

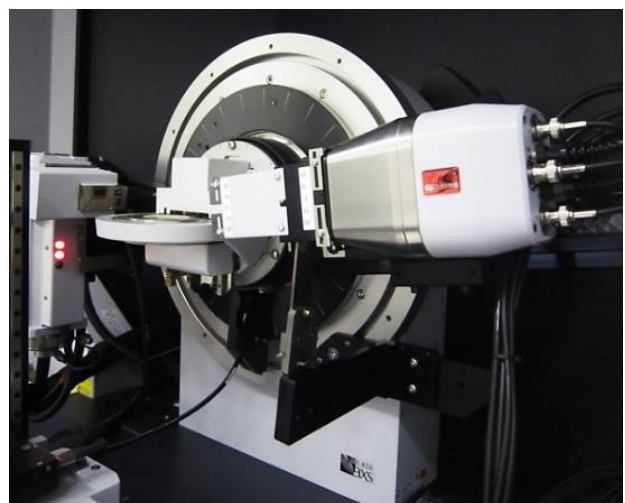


Abb. 6 Röntgendiffraktometrie mit dem Gerät Bruker-AXS
(Foto: A. Berger)

sie in Form eines Diffraktogramms auf. Letzteres zeigt somit die Intensität der Röntgenstrahlung im Zusammenhang zum entsprechenden Beugungswinkel. Anhand der Maximalwerte dieser Intensitäten können die Mineralgehalte mithilfe des Programms „DIFFRACplus EVA“ bestimmt werden. Dabei gilt es, charakteristische Peaks mit der Mineralien-Datenbank des Programms zu vergleichen und je nach Intensität zu quantifizieren. Dabei werden die Daten jeweils zu Beginn der Auswertung mit dem typischen Quarz-Peak kalibriert.

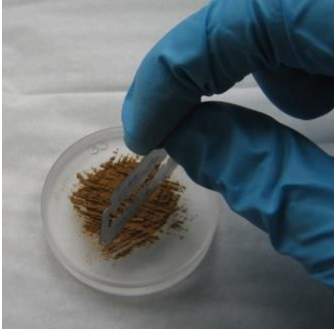


Abb. 7 Probenaufbereitung für die XRD-Analyse (Foto: A. Berger)

Die XRD-Untersuchung erfolgt an der Universität Zürich mit dem Gerät von Bruker-AXS (D8 Advance) (Abb. 6). Dabei wird von jedem Profil jeweils eine Messung vom Oberboden und vom C-Horizont durchgeführt. Bei der Probenaufbereitung wird die gemahlene Fraktion mithilfe einer Rasierklinge so auf den Glasbehälter aufgebracht, dass das Material nicht verstrichen, sondern nur angepresst wird um die Orientierung der Kristalle möglichst nicht zu beeinflussen (Abb. 7). Diese Proben werden auch hier durch die Analyse nicht zerstört. Allerdings lassen sich anhand dieser Methode nur kristalline Substanzen mit gut ausgebildeten Kristallstrukturen untersuchen.

3.3.6 Radiokarbonmethode

Die Methode basiert darauf, dass die ^{14}C -Konzentration eines Organismus nach dessen Tod durch den radioaktiven Zerfall mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren abnimmt (Press et al. 2008). Mit der AMS-Methode („Accelerator Mass Spectrometry“) wird die verbleibende ^{14}C -Konzentration von organischem Material gemessen, um über das Verhältnis zu einem stabilen Kohlenstoffisotop das Alter der Probe zu bestimmen. Mit dieser Methode wird Holzkohle von Profil 3 bei Goilly untersucht. Dazu wird die Holzkohlenprobe zuerst einer „Acid Alkali Acid“-Vorbehandlung (AAA) unterzogen, um eine Beeinflussung des Alters durch Kontaminationen zu verhindern. Anschliessend wird die Probe in eine Quarzampulle mit CuO als Sauerstoffquelle gefüllt und unter Vakuum erhitzt, um das im CuO absorbierte CO_2 zu entfernen. Ist das Ampullensystem wieder aufs Vakuum entleert, wird sie abgedichtet. Nun gilt es, die Probe im Ofen bei 900° Celsius zu verbrennen, um Kohlenstoffdioxid zu erhalten. Dieses wird mit Wasserstoff H_2 im Verhältnis 1:2.5 gemischt und mittels Eisenpulver katalytisch zu elementarem Kohlenstoff, Graphit, reduziert. Letzterer wird in ein Target gepresst und mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (ASM) im Labor für Ionenstrahlphysik der Eidgenössischen Technische Hochschule ETH Zürich mit einem Tandembeschleuniger auf die Kohlenstoffverhältnisse hin gemessen. (Jäger et al. 2015)

3.4 Berechnung langzeitlicher Verwitterungsraten

Verwitterungsraten ermöglichen die Interpretation von Trends vertikaler Verwitterungsprofile (Price & Velbel 2003). Indem die Kennzahlen mit dem Bodenalter in Abhängigkeit gebracht werden, gewähren sie Informationen über die Verwitterungsgeschichte eines Profils. Mithilfe der langzeitlichen Verwitterungsraten sollen die Zeitspannen der Mineraltransformationen von Schwermetallen an den vorliegenden Minenstandorten aufgezeigt werden. Daraus lässt sich ableiten, mit welchem Reaktivitätsgrad der freigesetzten Elemente zu rechnen ist. Die folgenden Indices werden für das Feinmaterial und Skelett des Oberbodens berechnet, während die Anzahl der B-Horizonte für statistische Aussagen zu klein ist.

3.4.1 Verwitterungsindices

Zur Charakterisierung der Verwitterung von Gestein und Boden existieren diverse Indices. Oft basieren sie auf der Bildung von molaren Verhältnissen zwischen mobilen und immobil Elementen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Verwitterung und Auswaschung der mobilen Elemente zu einer Erhöhung der Konzentration immobiler Elemente im Verwitterungsprofil führt (Munroe et al. 2007). Folglich sinkt der Index-Wert durch den Austrag mobiler Elemente über die Zeit: Je kleiner der Index-Wert ausfällt, desto stärker verwittert ist der Boden. Die molaren Proportionen bildet man mithilfe der Gewichtsprozentante aus den XRF-Daten, wobei die jeweiligen Elemente zuerst durch deren Molgewicht zu dividieren sind. Dadurch kann der Verwitterungsprozess anhand stöchiometrischer Veränderungen durch folgende Indices in Tabelle 2 aufgezeigt werden.

Tab. 2 Übersicht verwendeter Verwitterungsindices

Index	Formel	Quelle
(K+Ca)/Ti-Index	$\frac{(K + Ca)}{Ti}$	(Harrington & Whitney 1987)
Index B	$\frac{CaO + K_2O + Na_2O}{Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O}$	(Kronberg & Nesbitt 1981)
WIP Weathering Index of Parker	$100 * \left[\left(\frac{2Na_2O}{0.35} \right) + \left(\frac{MgO}{0.9} \right) + \left(\frac{2K_2O}{0.25} \right) + \left(\frac{CaO}{0.7} \right) \right]$	(Parker 1970)

Beim (K+Ca)/Ti-Index wird Kalium und Calcium während der Verwitterung als mobil und Titan als immobil betrachtet. Dieser Index, ursprünglich entwickelt zur Datierung von Wüstenlack in ariden Gebieten (Harrington & Whitney 1987), kann nach Dahms et al. (2012) auch für langzeitliche Verwitterungstrends von Bodenproben verwendet werden.

Der Index B (Kronberg & Nesbitt 1981) basiert auf der gleichen Grundlage, wobei der Ratio mit mobilen Oxiden wie Kalium-, Magnesium- und Natriumoxid und immobil Oxiden wie Aluminiumoxid gebildet wird. Dieser Index ist laut Dahms et al. (2012) robuster gegenüber lokalen Abweichungen als der (K+Ca)/Ti-Index, was im grossräumigen Untersuchungsgebiet von Vorteil ist.

Zudem wird der „Weathering Index of Parker“ (WIP) zur Betrachtung hinzugezogen, welcher 1970 von Andrew Parker für silikatisches Gestein entwickelt wurde. Souri et al. (2006) zeigen, dass sich der WIP auch zur Untersuchung von Bodenverwitterung bewährt. Dieser Index berücksichtigt im Unterschied zu anderen Verwitterungsindices nur die Alkali- und Erdalkalimetalle, wobei der WIP die Mobilität von Aluminiumoxid nicht ausschliesst (Price & Velbel 2003). Ein Vorteil gegenüber anderen Indices ist zudem, dass der WIP der geeignetste Index für Profile auf heterogenem Untergrund darstellt (Price & Velbel 2003). In Anbetracht der Tatsache, dass hier Bodenbildungen auf höchst heterogenem Schutthaldenmaterial untersucht werden, eignet sich der WIP besonders für die vorliegende Studie.

Nebst Titan kann auch Zirkonium oder Vanadium als nahezu immobiles Element betrachtet werden (Chadwick et al. 1990). Mit diesen drei Elementen wird zusätzlich das Verhältnis mit den jeweiligen Schwermetallen gebildet. Dabei handelt es sich nicht um einen Verwitterungsindex im klassischen Sinne, sondern um eine Aussage über den Schwermetallgehalt relativ zu einem immobilem Element. Zeigen jedoch alle drei Verhältnisse (Element-Ti-Ratio, Element-Zr-Ratio und Element-V-Ratio) einen Abreicherungstrend über die Zeit an, unterstützt dies die Aussage über die Verwitterung der mobilen Elemente.

3.4.2 Massenbilanz

Anhand der Konzentration immobilere Elemente, wie das schwer lösliche Titan, können langzeitliche Verwitterungsraten von Schwermetallen bestimmt werden (Egli et al. 2010). Dazu wird die Mineralogie und Chemie einer Bodenprobe von bekanntem Alter mit den Eigenschaften des Grundgesteins verglichen (Eggenberger 1995). Folglich ist die Massenbilanz eines immobilere Elements gegeben durch die Formel (Brimhall & Dietrich 1987):

$$V_p \rho_p C_{j,p} = V_w \rho_w C_{i,w} \quad (1)$$

wobei V_p und V_w das Volumen (m^3) bzw. die Schichthöhe (m) des Protoliths und des verwitterten Materials darstellen. $C_{i,p}$ und $C_{j,w}$ stehen für die Konzentrationen des immobilere Elements i (Titan) im Ausgangsgestein und im verwitterten Boden (kg/t), während ρ_p und ρ_w die Dichte des Protoliths bzw. des Verwitterungsprodukts (t/m^3) repräsentieren. Als Bezugswert für den unverwitterten Protolith dienen die XRF-Daten der C-Horizonte, welche im Bodenprofil am wenigsten der Verwitterung ausgesetzt sind (Egli & Fitze 2000). Indem das Verhältnis zwischen dem Volumen des verwitterten Materials und dem Ausgangsgestein gebildet wird, können mithilfe des Koeffizienten $\varepsilon_{i,w}$ volumetrische Änderungen im Profil aufgezeigt werden (Chadwick et al. 1990):

$$\varepsilon_{i,w} = \left(\frac{\rho_p C_{i,p}}{\rho_w C_{i,w}} \right) - 1 \quad (2)$$

Der relative Massenverlust $\tau_{j,w}$ eines Elements j im verwitterten Boden ist definiert als (Chadwick et al. 1990; Egli & Fitze 2000):

$$\tau_{j,w} = \left(\frac{\rho_w C_{j,w}}{\rho_p C_{j,p}} (\varepsilon_{i,w} + 1) \right) - 1 \quad (3)$$

Wird aus Gleichung (3) der Koeffizient $\varepsilon_{i,w}$ substituiert, resultiert die folgende Formel (Egli & Fitze 2000):

$$\tau_{j,w} = \left(\frac{C_{j,w} C_{i,p}}{C_{j,p} C_{i,w}} \right) - 1 \quad (4)$$

Anhand immobilere Elemente kann so über Anreicherungsfaktoren der relative Eintrag bzw. Austrag eines Schwermetalls bestimmt werden (Egli et al. 2008).

3.4.3 Kohlenstoff-Vorrat

Im Zuge der Bodenbildung über mehrere Jahrhunderte ist von einem Anstieg des Kohlenstoffanteils in einem Profil auszugehen. Deshalb wird mit folgender Gleichung untersucht, ob eine Korrelation zwischen dem organischem Kohlenstoffvorrat eines Profils und dem Bodenalter besteht (Mavris et al. 2010):

$$SOC_{Stock} = \sum_i^{dz} C_i d_i \rho_i (1 - RM) \quad (5)$$

wobei SOC_{Stock} die Menge des organischen Kohlenstoffvorrats (kg/m^2), C_i die Konzentration an organischem Kohlenstoff (kg/t), d_i die Mächtigkeit des Horizonts i (m), ρ_i die Lagerungsdichte (t/m^3) und RM der relative Anteil des Feinmaterials zum Bodenskelett bezeichnet.

3.5 Recherche und kartographische Darstellung

3.5.1 Datenbank der Schweizerischen Geotechnischen Kommission SGTK

Die SGTK stellt Daten und Informationen über die industrielle Verwertung der Mineralien und Gesteine der Schweiz zur Verfügung. Die Datenbank wird über die Anwendung „FilemakerPro“ betrieben und wird von der SGTK laufend aktualisiert und erweitert. Sie enthält verschieden umfangreiche Informationen über die abgebauten Elemente, zeitliche Daten über die Abbauphasen und teils auch quantitative Angaben zur Abbaumenge der Minen. Zudem sind die wichtigsten Standortdaten über die Minen in einer Excel-Tabelle zusammengefasst.

Mithilfe dieser Datengrundlage soll ermittelt werden, wo in der Schweiz ähnliche Verhältnisse wie am Mont Chemin existieren. Um diese Voraussetzung zu erfüllen, kommen nur Standorte in Frage, die ebenfalls saure Bodenbedingungen aufweisen. Denn erst eine Versauerung des Bodens ermöglicht die Mobilisierung der Schwermetalle und erhöht die Konzentration der bioverfügbaren, gelösten Stoffe (Scheffer et al. 2010). Daraus folgt, dass nur Gebiete mit silikatischem Grundgestein wie Gneise oder Granite in Frage kommen, was beispielsweise beim Aar- oder Gotthard-Massiv der Fall ist. Standorte mit kalzitischem Untergrund werden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da die Karbonate als Puffer der Versauerung entgegenwirken und so die Mobilisierung der Schwermetalle verhindern. Zur Klassifizierung der Minenstandorte nach geologischem Untergrund wird das Geoportal des Bundes verwendet, welches den Grossteil der Minenstandorte als Punktdaten unter dem Namen „Vererzungen“ enthält. Weiter wird ein Fokus auf die letzte Abbautätigkeit der Minen gesetzt. Anhand dieser Altersangabe soll mithilfe der zuvor berechneten Verwitterungsraten eine Aussage über die Reaktivität der Elemente in den Minenabraumhalden gemacht werden. Dabei wird in einer elementspezifischen Betrachtung der Standorte ein Fokus auf Blei- und Kupfer-Lagerstätten gelegt. Für Minen ohne Altersangabe über deren Abbautätigkeit wird eine Rest-Reaktivität angenommen, da diese Standorte dennoch Potential zur Reaktivität aufweisen.

3.5.2 Datenaufbereitung und -darstellung

Mithilfe des Geoportals des Bundes können in einem ersten Schritt Vererzungen auf silikatischem Untergrund ausgewiesen werden. Dabei scheiden bei der Sortierung der Excel-Tabelle mit den Standortdaten Minen auf kalzitischem Untergrund in der Datenbank aus. Übrig bleibt eine Sammlung der Minenstandorte, welche Potential zu sauren Bodenbedingungen aufweisen. In einem zweiten Schritt kommt die SGTK-Datenbank zur Anwendung. Mit ihrer Hilfe werden die Excel-Standortdaten mit den jeweiligen Vorkommen an Elementen ergänzt. Weiter liefert die SGTK-Datenbank das Alter des Letztabbaus aller Standorte, welches ebenfalls in die Excel-Tabelle überführt wird. Ferner können Standorte herausgefiltert werden, welche geologische Aufschlüsse ohne Abbautätigkeit darstellen. Nach dieser Datenaufbereitung lassen sich die Minenstandorte zuerst nach den Elementen Blei und Kupfer und im Anschluss nach Alter des Letztabbaus sortieren. Die resultierende Excel-Tabelle, welche die xy-Koordinatendaten der Minenstandorte enthält, kann in der ArcGIS Software tabellarisch als Punktdaten eingefügt werden. Dabei wird die Reaktivität der Minenstandorte entsprechend der langzeitlichen Verwitterungstrends in Klassen wie „stark reaktiv“, „mittel reaktiv“ und „schwach reaktiv“ eingeteilt und kartographisch dargestellt. In einem weiteren Schritt gilt es, die Minenstandorte mit den Grundwasserschutzzonen und -arealen abzugleichen, um die potentiellen Risiken für die Trinkwasserfassungen aufzuzeigen. Die nötigen Grundwasserdaten können über die kantonalen Behörden als Polygon-Shapefiles bezogen werden. Mit dem Tool „Select By Location“ lassen sich räumliche Beziehungen der Punktdaten zu den Grundwasser-Polygonen untersuchen. Damit werden die Minenstandorte gefiltert, welche sich in den Schutzzonen und -arealen befinden oder in einer bestimmten Distanz dazu lokalisiert sind.

4 Ergebnisse

4.1 Zeitliche Einordnung der Profile

4.1.1 Chez Larze I & III

Bei der Eisenerzmine Chez Larze wurde im 19. Jh. magmatisches Ganggestein genutzt, das in den stark mylonitisierten kristallinen Gneisen und Schiefen vorhanden ist. Der Hauptabbau von Eisen fand hier bei den Galerien I und II statt, während es sich bei der Galerie Chez Larze III um eine eher kleinere Abbaustätte handelte: Ihr Stollen weist nur rund zehn bis fünfzehn Meter Ausdehnung auf (Ansermet 2001). Der Letztabbau bei Chez Larze III wird nach Ansermet (2001) auf Mitte des 19. Jh. geschätzt. Da es sich bei Profil 2 um den gleichen Stollen wie beim Profil 1 handelt, wird hier von der gleichen Zeitspanne der Minenbautätigkeit ausgegangen.

Beim Stollen Chez Larze I (Profil 6) variierte der Eisenerzgehalt während dem Abbau stark, weshalb die Erze zuerst per Handscheidung angereichert werden mussten (Hugi et al. 1948). Dabei wurde das Erz von zu geringer Qualität auf der Schutthalde bei Chez Larze I abgelagert, während das hochwertige Material zur Weiterverarbeitung nach Bovernier kam (Hugi et al. 1948). Aus Rentabilitätsgründen wurden die Bergbautätigkeiten bei Chez Larze I im Jahr 1873 vollständig beendet (Hugi et al. 1948).

4.1.2 Goilly

Es wird vermutet, dass es sich beim Standort Goilly um eine kaum nennenswerte Exploration handeln kann, da der hier vorkommende Hämatit ein quantitativ zu armes Vorkommen darstellt (Ansermet 2001). Der Mineneingang ist schwierig auffindbar, jedoch gibt es in unmittelbarer Nähe eine grosse Menge an Schlackenablagerungen (Abb. 8), welche aus der Merowinger-Zeit zwischen 634 und 658 Jahre n. Chr. stammt (Serneels & Beck 1998). Damit ist es naheliegend, dass auch der Graben bei Profil 3 auf ein älteres Datum zurückzuführen ist. Diese Vermutung wird durch die ¹⁴C-Datierung der Holzkohle bestätigt, wobei diese auf das Jahr 997 n. Chr. datiert werden kann. Der Graben ist somit über tausend Jahre alt. Der Zweck der Grabenanlegung ist historisch nicht überführt. Allerdings kann vermutet werden, dass es sich bei den Holzkohlestücken um Überreste einer früheren Köhlerei handelt, welche zum Heizen der Eisen-Brennöfen benötigt wurde (Ansermet 2001).



Abb. 8 Merowinger-Schlacke bei Goilly
(Foto: A. Berger)

4.1.3 La Crettaz

Die Minentätigkeit bei La Crettaz gründet im geologischen Vorkommen von Fluorit und Galenit des hydrothermal gebildeten Ganges, der in südwestlicher Richtung über den Tête des Econduits streicht. Die Ablagerungen bei Profil 7 stammen von der letzten Abbautätigkeit nach Blei und Silber. Diese fanden bei La Crettaz im Jahr 1864 statt (Ansermet 2001). Bei der kleinräumigen Aufschüttung von Profil 4 handelt es sich hingegen nach mündlicher Aussage von Stefan Ansermet um das Ergebnis der letzten Prospektionen nach Fluorit zwischen 1972 und 1976.

4.1.4 Couloir Collaud III

Die Eisenerzmine Couloir Collaud liegt unterhalb von Chemin Dessus und basiert ebenfalls auf dem Magnetitvorkommen der stark mylonitisierten, kristallinen Gneisen und Schiefen. Weiter existieren im Gneis Marmorbänke, welche von Couloir Collaud bis zum Col des Planches reichen. Um diese zu erschliessen, wurde von 1924 bis 1925 der Stolleneingang Couloir Collaud III zur Prospektion von Marmor angelegt

(Hugi et al. 1948). Somit wird bei der Schutthalde von Profil 5 mit einer letzten Aufschüttung im Jahr 1925 gerechnet.

4.1.5 Grands Esserts

Der Standort Grands Esserts ist zwischen Tête des Econduits und Col des Planches im Wald gelegen, wobei Überreste alter Mauern sowie das Fundament einer häuslichen Einrichtung bis heute auffindbar sind. Der Minenabbau bei Grands Esserts gründet im Eisenerzvorkommen und wird nach Ansermet (2001) auf das 18. oder 19. Jh. geschätzt. Er begründet dies erstens damit, dass sich hier bei manchen Schutthaldenfragmenten Überreste der Exploration mit Schwarzpulver feststellen lassen, was für eine Minentätigkeit zwischen dem 18. und 19. Jh. spricht. Denn vom 17. Jh. und davor existiert in der Literatur keine Erwähnung über die Nutzung von Sprengstoff im Wallis (Ansermet 2001). Zweitens lag während dem 20. Jh. keine Minentätigkeit bei Grands Esserts vor, da hier keine Zeugen moderner Abbaumethoden oder Geräte existieren, wie sie bei anderen Standorten beim Mont Chemin bis heute sichtbar sind. In Anbetracht dessen, wird in der vorliegenden Arbeit der Letztabbau bei Profil 8 auf 1800 geschätzt.

4.1.6 Les Trappistes

Die Mine von Les Trappistes liegt in der Nähe von Sembrancher oberhalb des Flusses La Dranse, wobei deren mächtige Schutthalde auf der topographischen Karte gut erkennbar ist. Das Rohstoffvorkommen gründet wie bei La Crettaz im hydrothermal gebildeten Ganggestein aus Fluorit und Galenit mit Beimengungen von Silber. Historische Belege zeigen, dass die Mine wahrscheinlich schon im Mittelalter für ihr Silber bekannt war. Obwohl bereits im Jahr 1814 erstmals das Vorhandensein von Fluorit erwähnt wurde, lag der Fokus im 19. Jh. noch auf dem Blei- und Silberabbau. Erst nach dem ersten Weltkrieg wurde das Fluoritvorkommen bei Les Trappistes im Zuge des steigenden Interesses nach Fluorit als Fließmittel für die Stahl- und Eisenindustrie wiederentdeckt. Die wohl bedeutendste und gleichzeitig letzte Ausbeutung fand von 1941 bis 1945 statt, als 1500 Tonnen Fluorit abgebaut wurden. Der Letztabbau nach Fluorit erfolgte bei Les Trappistes somit um 1946, als die Abbautätigkeit wegen zu geringer Wirtschaftlichkeit eingestellt wurde. (Ansermet 2001)

4.1.7 Peiloz

Bei Peiloz handelt es sich um eine Silbermine aus dem 16. Jh., welche bekannt ist für ihren sehr hohen Silbergehalt (Ansermet & Meisser 1996). Guénette-Beck et al. (2009) zeigen, dass die Blei-Isotope von datierten Münzen des Bischofs von Sion, welcher die Minenrechte von Peiloz 1475 erworben hatte, mit den Erzproben von Peiloz übereinstimmen. Anhand dieser Studie kann bei der Mine Peiloz das Ende der Exploration für die Münzprägung auf das Jahr 1549 datiert werden. Demzufolge wird bei Profil 10 von einem Letztabbau von 1549 ausgegangen, was ein Bodentalter von 465 Jahren ergibt in Bezug auf den Beprobungszeitpunkt im Jahr 2014. Im Vergleich mit Profil 11 wird jedoch sichtbar, dass es sich beim zweiten Profil um eine jüngere Bodenbildung handeln muss, da die Verbraunung noch kaum entwickelt und auch die Verwitterung des Materials weniger ausgeprägt ist. Es ist erwiesen, dass bei Peiloz auch nach 1549 noch ein Abbau stattgefunden hatte, wobei die Lagerstätte erst 1723 vollständig ausgeschöpft war (Guénette-Beck et al. 2009). Da das Profil 11 relativ nahe am Eingang des Mineneingangs liegt, wird davon ausgegangen, dass die Aufschüttung nicht in der Hauptabbauphase vor 1549 entstanden war, sondern von der letzten Abbautätigkeiten im Jahr 1723 stammt.

Die folgende Tabelle 3 zeigt eine Übersicht zur zeitlichen Einordnung der Profile, deren Bodentalter bezogen auf den Beprobungszeitpunkt im Jahr 2014 sowie allgemeine Daten zu den untersuchten Standorten.

Tab. 3 Übersicht zu den allgemeinen Daten und zeitliche Einordnung der untersuchten Profile

Profilnr. und Name	Rohstoff	Letztabbau	Bodenalter [a] (bez. 2014)	Datierungsquelle	Koordinaten	Höhe [m ü. M.]
Profil 1 Chez Larze III-1	Magnetit (Fe)	1850	164	(Ansermet 2001)	574'455/104'315	1335
Profil 2 Chez Larze III-2	Magnetit (Fe)	1850	164	(Ansermet 2001)	574'465/104'310	1332
Profil 3 Goilly	Hämatit (Fe)	976-1017	1018	¹⁴ C-Methode	575'010/104'686	1451
Profil 4 La Crettaz-1	Fluorit (F)	1976	38	Stefan Ansermet, mündlich	574'956/104'453	1425
Profil 5 Couloir Collaud III	Magnetit (Fe)	1925	89	(Hugi et al. 1948)	574'150/103'870	1078
Profil 6 Chez Larze I	Magnetit (Fe)	1873	141	(Hugi et al. 1948)	574'380/104'365	1335
Profil 7 La Crettaz-2	Galenit (Pb & Ag)	1864	150	(Ansermet 2001)	574'970/104'440	1419
Profil 8 Grands Esserts	Magnetit (Fe)	1800	214	(Ansermet 2001)	575'340/104'830	1433
Profil 9 Les Trappistes	Fluorit (F)	1946	68	(Ansermet 2001)	575'918/103'165	699
Profil 10 Peiloz-1 (Val de Bagnes)	Galenit (Pb & Ag)	1549	465	(Guénette-Beck et al. 2009)	582'413/100'124	1617
Profil 11 Peiloz-2 (Val de Bagnes)	Galenit (Pb & Ag)	1723	291	(Guénette-Beck et al. 2009)	582'369/100'061	1630

4.2 Feldarbeit

Von den elf Profilen befinden sich neun beim Mont Chemin und zwei in der Nähe von Bruson im Val de Bagnes. Da die Standorte ausschliesslich auf Schuttablagerungen historischer Minenanlagen situiert sind, handelt es sich bei allen Bodentypen um Anthrosolesole. Bezüglich Wasserhaushalt konnte bei jedem Profil ungehinderte Sickerung festgestellt werden.

4.2.1 Profil 1: Chez Larze III-1

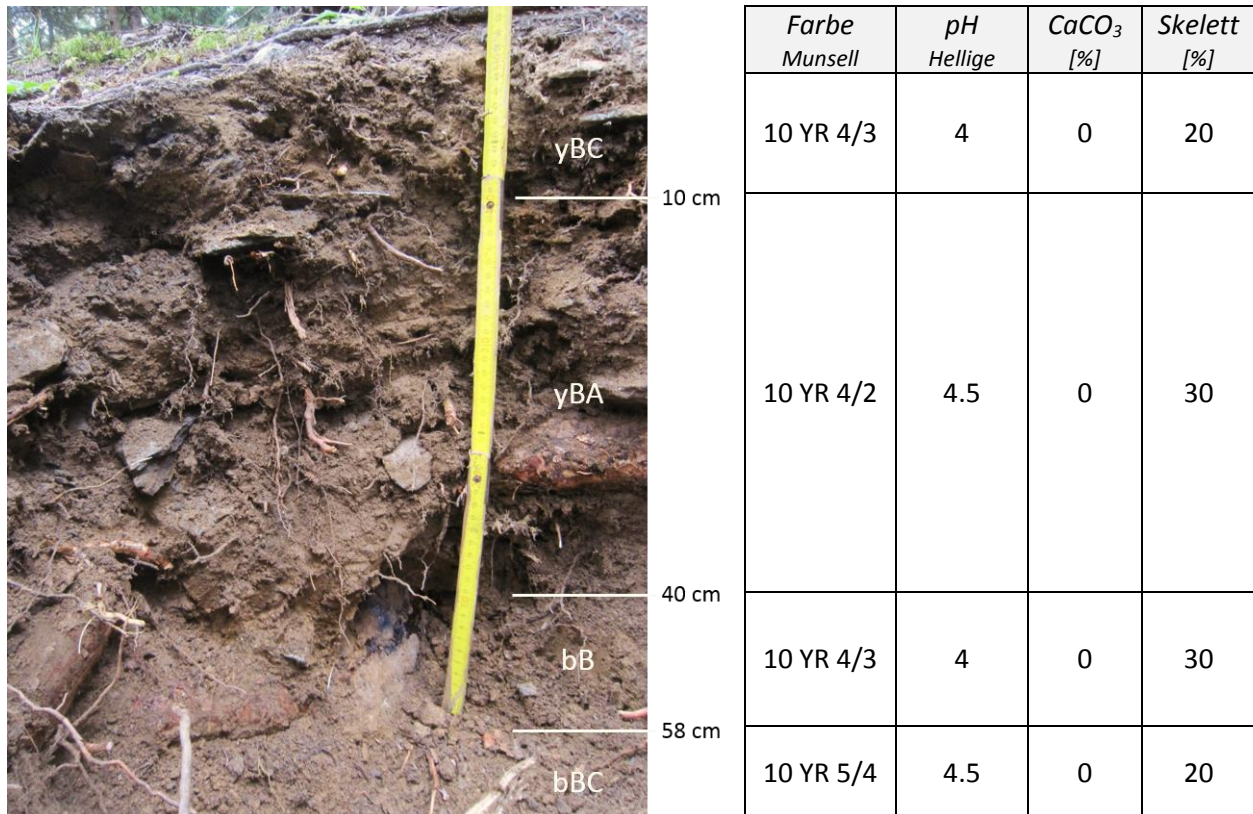


Abb. 9 Profilmfoto und Bodenparameter bei Chez Larze III-1 (Foto: A. Berger)

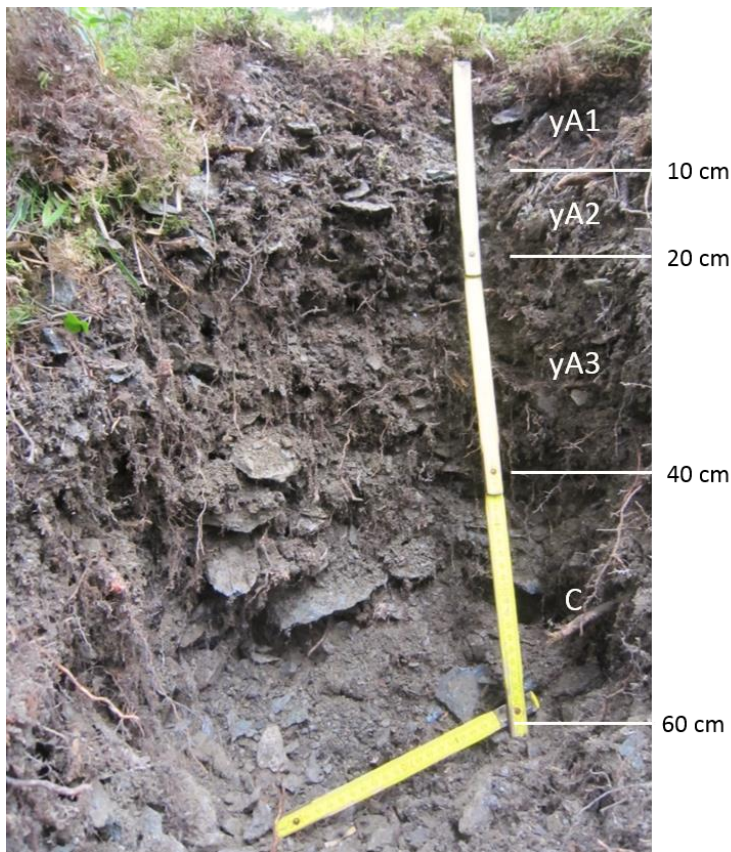
Das am 18.09.2014 untersuchte Profil (Abb. 9) mit einer Gesamttiefe von 58 cm liegt in unmittelbarer Nähe zum Eingang der Mine Chez Larze III (Abb. 10). Der Standort ist im Nadelwald auf einer Höhe von 1335 m ü. M. gelegen, wo eine Neigung von höchstens 2° herrscht. Die Messungen mit dem mobilen XRF-Gerät zeigen erhöhte Werte unter anderem für Kupfer (1478 mg/kg), Zink (177 mg/kg) und Arsen (78 mg/kg), was sich auch in den Laborresultaten widerspiegelt (Anhang 2 & 3).



Abb. 10 Stolleneingang Chez Larze III (Foto: A. Berger)

Der yBC-Horizont ist 10 cm mächtig und wird als Überschüttung infolge der Bergbautätigkeit interpretiert. Darunter folgt ein diffuser Übergang zu einem ebenfalls aufgeschütteten yBA-Horizont in 10-40 cm Tiefe, welcher starke Durchwurzlung aufweist. In 40-58 cm Bodentiefe existiert ein begrabener bB-Horizont, der noch immer leicht durchwurzelt ist. Hier sind zudem kleinere Schlackenstücke auffindbar, welche auf die anthropogene Nutzung hinweisen. Unterhalb einer Tiefe von 58 cm können noch die Anzeichen eines bBC-Horizonts festgestellt werden, welcher kaum mehr eine Durchwurzlung aufweist. Das gesamte Profil liegt im sauren Bereich, was auch die Laborresultate bestätigen (Tab. 4). Es ist kein Humus feststellbar. Zudem sind alle Horizonte durchwegs skeletthaltig, wobei im yBA- und bB-Horizont mit 30 % am meisten Skelett vorhanden ist. Das Ausgangsgestein ist silikatisch, wobei im gesamten Profil kein Karbonat nachweisbar ist.

4.2.2 Profil 2: Chez Larze III-2



Farbe Munsell	pH Hellige	CaCO ₃ [%]	Skelett [%]
10 YR 2/1	4	0	20
2.5 Y 3/2	6	0	30
2.5 Y 3/2	7	2-10	30
2.5 Y 4/1	7	<2	40

Abb. 11 Profilfoto und Bodenparameter bei Chez Larze III-2 (Foto: A. Berger)

Wenige Meter vom Stollen Chez Larze III entfernt, ist am 18.09.2014 das zweite Profil (Abb. 11) mit einer Gesamttiefe von 60 cm bei einer Ablagerung von Minenmaterial (Abb. 12) erstellt worden. Die naturräumlichen Bedingungen sind somit dieselben wie bei Profil 1. Auch hier kann mit einer Schwermetallbelastung gerechnet werden, da die Messung mit dem mobilen XRF-Gerät erhöhte Werte unter anderem für Blei (299 mg/kg), Zink (751 mg/kg) oder Kupfer (562 mg/kg) zeigt, was die Laborresultate bestätigen (Anhang 2 & 3).

Nach einem Auflagehorizont von mehreren Zentimetern folgt die anthropogene Überschüttung des Oberbodens von 40 cm Mächtigkeit. Dieser wird in drei Unterhorizonte unterteilt, wobei der yA1-Horizont bis in 10 cm und der yA2-Horizont bis in 20 cm Tiefe reichen. Die zwei Horizonte befinden sich nach dem Hellige-pH-Test in saurem bis schwach saurem Bereich, wobei die Laborresultate in Tabelle 4 pH-Werte bei 6.05 und 6.7 zeigen. Darunter folgt in 20-40 cm Tiefe der yA3-Horizont mit einem geschätzten pH-Wert von 7, der mit den Laborresultaten nahezu deckungsgleich ist. Dieser zeigt eine mittlere Reaktion mit Salzsäure, was einem Karbonatgehalt von 2-10 % entspricht. Somit liegt in 20 cm Tiefe die Karbonatgrenze. Der gesamte A-Horizont weist eine gute Durchwurzelung auf, während diese im C-Horizont zwischen 40 und 60 cm stark abnimmt. Als Humusform wird Moder festgestellt. Im C-Horizont beträgt der Gehalt an Karbonat <2 %, wobei der Skelettgehalt hier mit 40 % am höchsten ist und somit im Profil mit der Tiefe zunimmt.



Abb. 12 Aufschüttung bei der Mine Chez Larze III mit Profil 2 (Foto: A. Berger)

4.2.3 Profil 3: Goilly

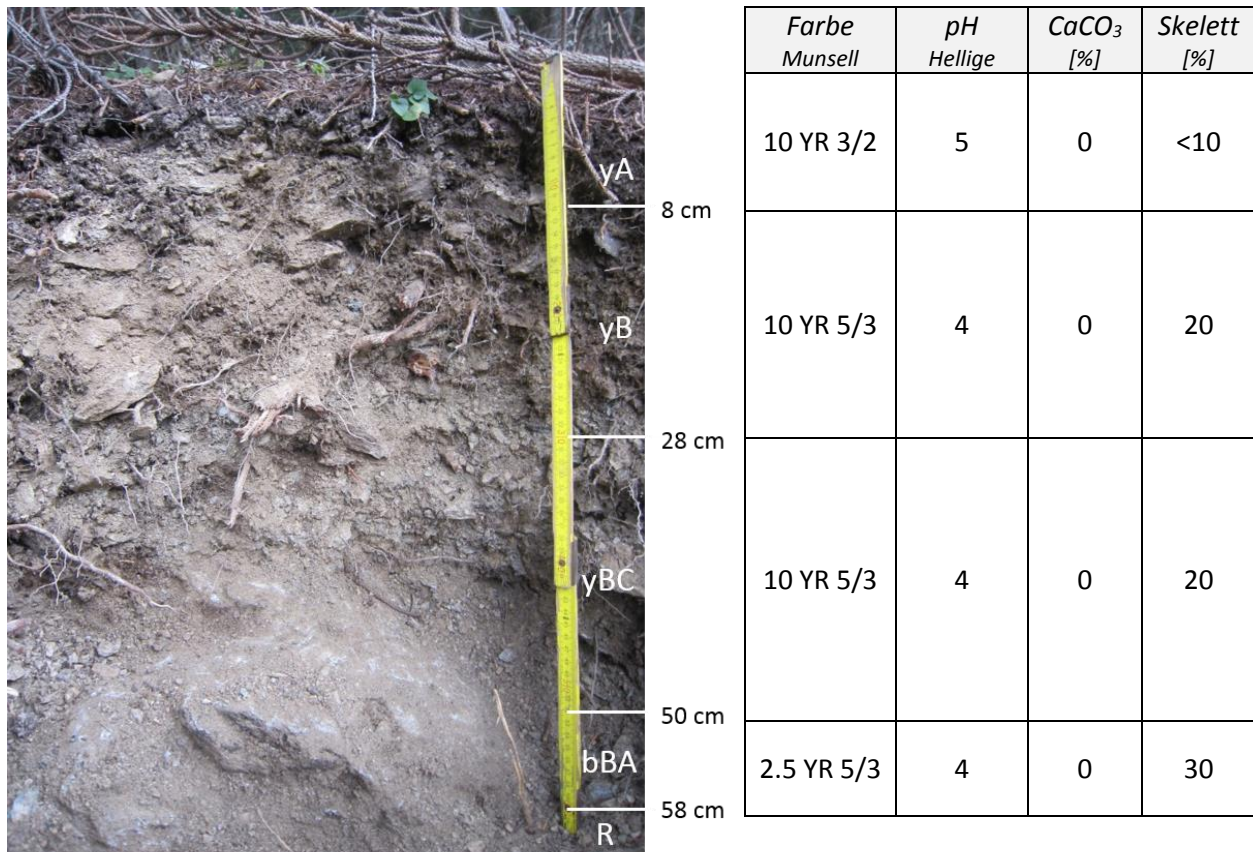


Abb. 13 Profilfoto und Bodenparameter bei Goilly (Foto: A. Berger)

Beim Standort Le Goilly nordöstlich von Tête des Econduits liegt das am 18.09.2015 erstellte Profil 3 (Abb. 13) an der rechten Seite einer anthropogen geprägten Grabenstruktur von 4 m Länge (Abb. 14). Das Profil ist bei 2° Neigung im Nadelwald auf 1451 m ü. M. lokalisiert, wobei die Profiltiefe 58 cm beträgt. Die mobilen XRF-Resultate weisen mit einer Messung von 72 mg/kg As auf erhöhte Arsengehalte hin.

Das Profil 3 zeigt bis in eine Tiefe von 50 cm eine überschüttete Auflagerung und darunter ein begrabener Horizont. Der aufgeschüttete, skelettarme Oberboden beträgt 8 cm Mächtigkeit, worauf in 8-20 cm Tiefe ein skeletthaltiger yB-Horizont besteht. In 28 cm Tiefe folgt ein diffuser, welliger Übergang zum yBC-Horizont, der auch als unvollständige Ausbildung des B-Horizonts interpretiert werden kann. In 50 cm Tiefe beginnt der 8 cm mächtige, begrabene bBA-Horizont, der auf das ursprüngliche, natürliche Terrain hinweist. Er enthält als Indiz auf die anthropogene Nutzung Holzkohlenstücke, welche mit der ¹⁴C-Methode datiert werden (Kap. 4.3.6). In 58 cm Tiefe markiert das silikatische Festgestein die Felsunterlage. Als Humusform ist modriger Mull vorhanden. Das Profil liegt mit den geschätzten pH-Werten von 5 und 4 im sauren Bereich, wobei die Laborresultate ein ähnliches Bild zeigen (Tab. 4). Damit ist auch kein Vorhandensein von Karbonat feststellbar.



Abb. 14 Anthropogener gebildeter Graben beim Standort Goilly (Foto: A. Berger)

4.2.4 Profil 4: La Crettaz-1

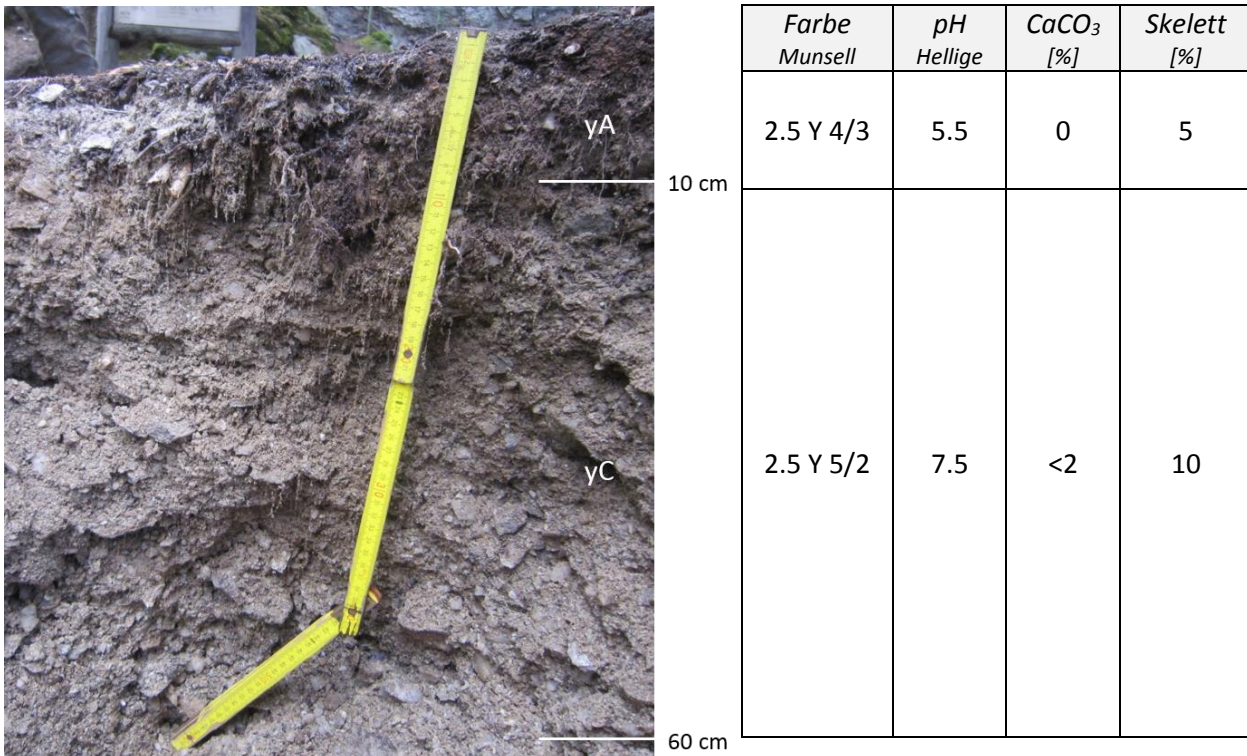


Abb. 15 Profilbild und Bodenparameter bei La Crettaz-1 (Foto: A. Berger)

Das Profil 4 (Abb. 15) mit einer Tiefe von 60 cm ist am 18.09.2014 in einer kleinräumigen Materialablageung nahe des Mineneingangs von La Crettaz angelegt worden. Der Standort liegt auf 1425 m ü. M. im Nadelwald, wobei die Neigung ungefähr 10° entspricht. Aufwandbedingt ist hier auf die Messungen mit dem mobilen XRF-Gerät verzichtet worden. Allerdings können im Schuttmaterial kleine Stücke von Galenit (Bleiglanz) aufgefunden werden, was mit grosser Wahrscheinlichkeit für eine Bleibelastung spricht.

Der aufgeschüttete Oberboden ist 10 cm mächtig und weist leichte Durchwurzelung auf. Karbonat ist im yA-Horizont nicht vorhanden, während der Hellige-pH-Wert von 5.5 ungefähr mit dem Laborresultat übereinstimmt. Das Vorhandensein von Humus kann hier nicht festgestellt werden. Zwischen 10 und 60 cm Tiefe folgt der aufgeschüttete yC-Horizont, welcher ein Skelettanteil von 10 % und kaum mehr Durchwurzelung aufzeigt. Dieser weist mit einem geschätzten pH-Wert von 7.5 auf ein alkalisches Milieu hin, wobei das Laborresultat bei 5.95 liegt (Tab. 4). Hier reagiert das Material schwach mit Salzsäure, somit kann mit einem Karbonatanteil von weniger als 2 % gerechnet werden.

4.2.5 Profil 5: Couloir Collaud III

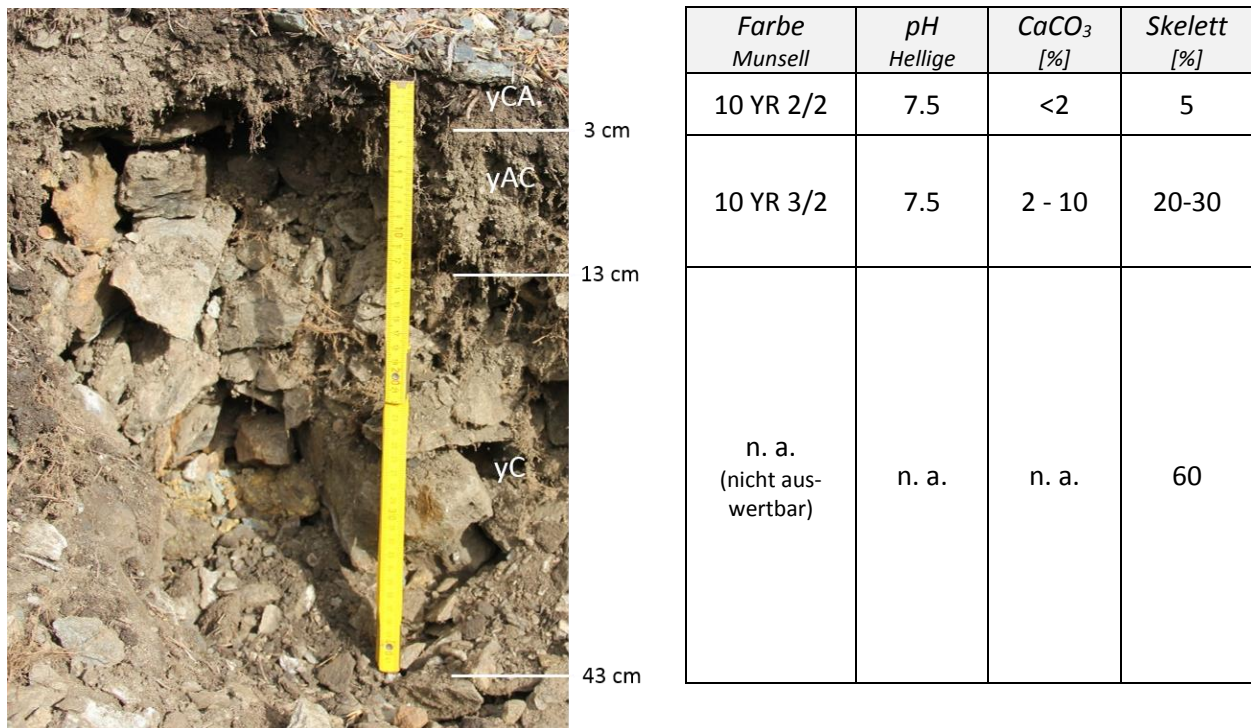


Abb. 16 Profilfoto und Bodenparameter bei Couloir Collaud III (Foto: A. Berger)

Der Standort ist auf einer Schutthalde in der Nähe des Stolleneingangs Couloir Collaud III auf einer Höhe von 1078 m ü. M. bei einer Hangneigung von 15° in südlicher Exposition lokalisiert. Das am 14.10.2014 untersuchte Profil 5 (Abb. 16) liegt nahe von lichtigem Nadelwald. Die Profiltiefe beträgt 43 cm. Bei der mobilen XRF-Messung fallen besonders hohe Zinkwerte (400 mg/kg) sowie Arsenwerte (39 mg/kg) auf, was die Labor-XRF-Auswertung ebenfalls bezeugt (Anhang 2 & 3).

Hier sind alle Horizonte als Überschüttungen zu betrachten, da es sich wahrscheinlich um eine eher tiefgründige Schutthalde handelt. In den obersten 3 cm des Profils ist ein skelettarmes yCA-Horizont vorhanden, welcher weniger als 2 % Karbonat enthält. Die Humusform wird trotz geringer Auflage als Moder bezeichnet. In 3-13 cm Tiefe folgt ein skeletthaltiger Übergangshorizont yAC, wobei sich hier noch kein B-Horizont gebildet hat. Der Hellige-pH-Test weist in beiden Horizonten mit einem Wert von 7.5 auf ein schwach alkalisches Milieu hin, was die Laborresultate in Tabelle 4 bestätigen. In 13-43 cm Tiefe folgt der yC-Horizont, welcher mit einem Skelettanteil von 60 % als skelettreich gilt. Die Lagerung des Skeletts weist Hohlräume auf, weshalb das tiefste Wurzelvorkommen trotz yC-Horizont bis in 25 cm Tiefe reicht.

Bei Couloir Collaud sind im Gneis gelegene Marmorbänke vorhanden, deren Vorhandensein die alkalischen Bedingungen im Bodenprofil erklären. Die inhomogenen Bestandteile der Schutthalden-Komponenten zeugen von der vielfältigen Geologie der Schutthalde (Abb. 17).



Abb. 17 Schutthalde bei Couloir Collaud III mit Profil 6 (Foto: A. Berger)

4.2.6 Profil 6: Chez Larze I

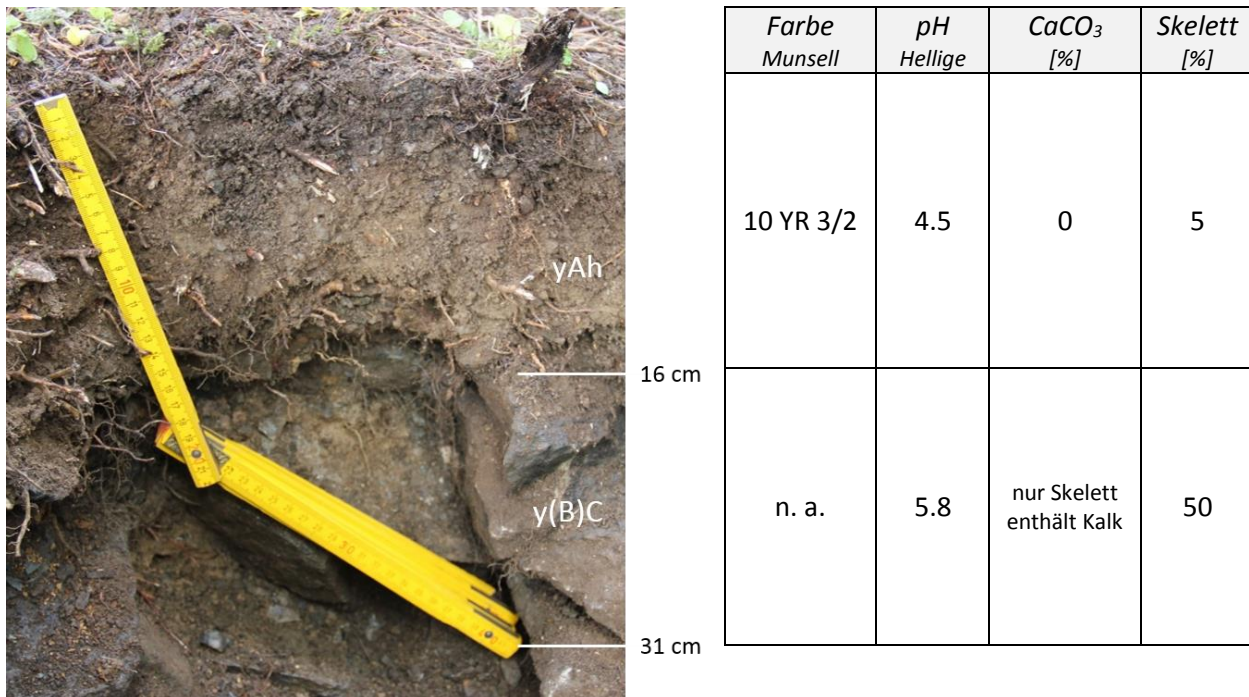


Abb. 18 Profilfoto und Bodenparameter bei Chez Larze I (Foto: A. Berger)

Das Profil 6 (Abb. 18) ist am 14.10.2014 in der Nähe des Stollens Chez Larze I auf 1335 m ü. M. angelegt worden. Der Standort befindet sich auf einer anthropogen aufgeschütteten Terrasse, womit das Gelände beim Profil keine Neigung aufweist. Die Aufschüttung scheint genug lange zu bestehen, so dass sich ein Mischwald darauf etablieren konnte. Die Gesamttiefe des Profils beträgt 31 cm. Die Messungen mit dem mobilen XRF-Gerät zeigen unter anderem besonders für Arsen hohe Werte (331 mg/kg), was auch in den Labor-XRF-Resultaten sichtbar wird (Anhang 2 & 3). Ferner liegt der hier gemessene Cobaltwert bei 924 mg/kg. Der hohe Arsen- und Cobaltgehalt an diesem Standort könnte vom Mineral Erythrin („Kobaltblüte“, ein Cobaltarsenat) im Ausgangsgestein herrühren, wobei dieses in der Mine Chez Larze I auffindbar ist (Abb. 19).



Abb. 19 Erythrin im Stollen von Chez Larze I (Foto: A. Berger)

Der Oberboden besteht bis in 16 cm Tiefe aus einem yAh-Horizont, dessen Humusform als Moder bezeichnet wird. Er enthält kein Karbonat, was sich im geschätzten pH-Wert von 4.5 bestätigt. Auch die Laborwerte zeigen für diesen Horizont ein saures Milieu (Tab. 4). In 16-31 cm Tiefe folgt der skelettreiche y(B)C-Horizont, welcher nur sehr lokal verbraunt ist. Er weist einen Hellige-pH-Wert von 5.8 auf, wobei die Laborwerte schwach saure Bedingungen zeigen. Das tiefste Wurzelvorkommen liegt bei 25 cm Tiefe.

4.2.7 Profil 7: La Crettaz-2

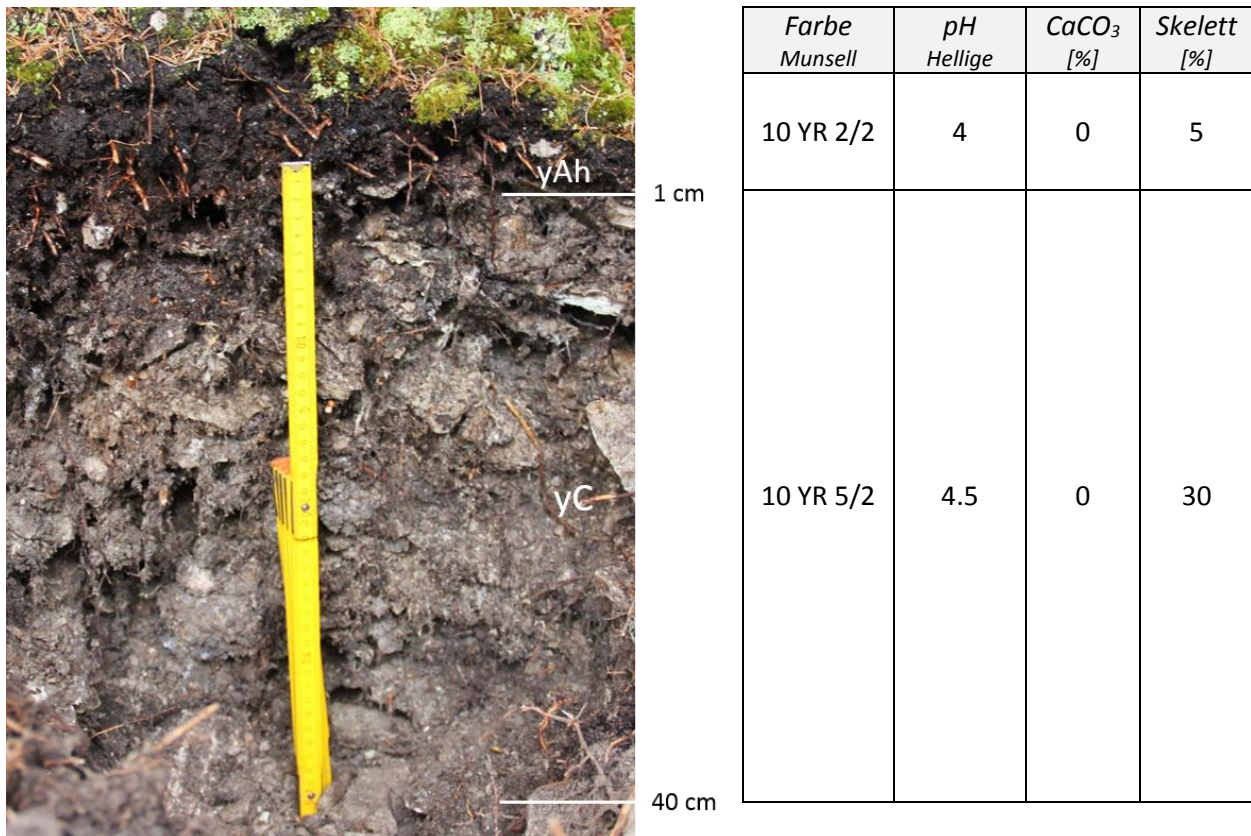


Abb. 20 Profilfoto und Bodenparameter bei La Crettaz-2 (Foto: A. Berger)

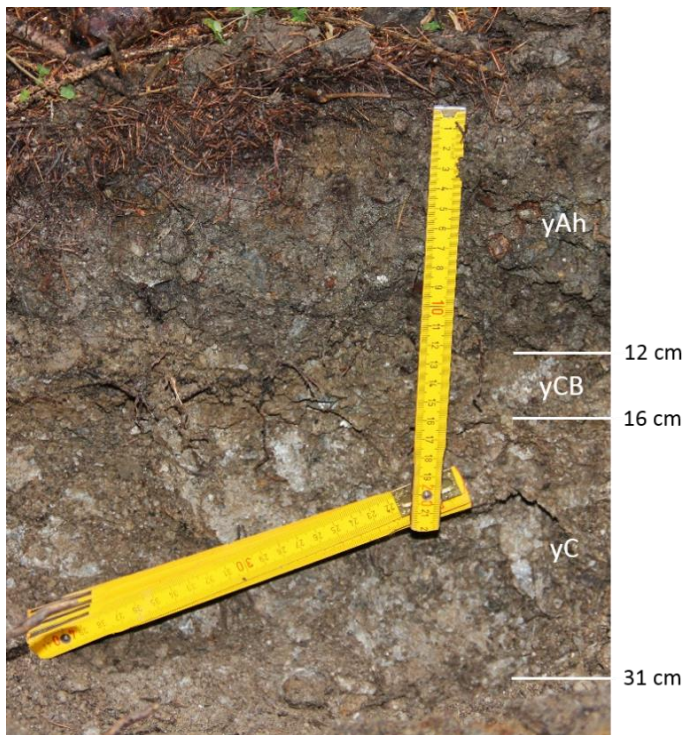
Die am 14.10.2015 untersuchte Ablagerung (Abb. 20) liegt bei der gleichen Mine wie Profil 4. Allerdings handelt es sich hier um eine Schutthalde von grösserem Ausmass. Der Standort liegt auf einer Höhe von 1419 m ü. M. bei 10° Neigung mit südöstlicher Exposition. Die Profiltiefe misst 40 cm. Der mit dem mobilen XRF-Gerät gemessene Bleigehalt liegt bei 1108 mg/kg, wobei die Laborresultate das Fünffache des Werts zeigen (Anhang 2 & 3). Diese Werte sind plausibel in Anbetracht dessen, dass hier Handstücke von Galenit (Abb. 21) in der Ablagerung gefunden werden können.

Im Profil 7 existiert ein sehr geringmächtiger, humoser γAh-Horizont. Die Humusform ist Moder. Darauf folgt bis in eine Tiefe von 40 cm der aufgeschüttete γC-Horizont mit einem Skelettanteil von 30 %. Beide Horizonte weisen mit einem geschätzten pH-Wert von 4 und 4.5 auf ein saures bis stark saures Milieu hin, wobei die Laborresultate im ähnlichen Bereich liegen (Tab. 4). Daraus folgt, dass das Profil karbonatfrei ist. Die Durchwurzelung ist bis in 40 cm Tiefe vorhanden.



Abb. 21 Galenit-Fundstück aus dem Profil 7 bei Chez Larze (Foto: A. Berger)

4.2.8 Profil 8: Grands Esserts



Farbe Munsell	pH Hellige	CaCO ₃ [%]	Skelett [%]
10 YR 3/2	6	0	5-10
10 YR 4/3	6.5	0	5-10
10 YR 5/3	7.5	2-10	30

Abb. 22 Profilfoto und Bodenparameter bei Grands Esserts (Foto: A. Berger)

Das am 14.10.2014 erstellte Profil 8 (Abb. 22) bei Grands Esserts mit einer Tiefe von 31 cm liegt auf 1433 m ü. M im flachen Gelände eines Nadelwaldes. Die mobilen XRF-Messungen zeigen insbesondere für Kupfer (9861 mg/kg), Wolfram (1809 mg/kg), Blei (224 mg/kg) und Arsen (210 mg/kg) erhöhte Werte, wobei die Laborresultate ein ähnliches Bild liefern (Anhang 2 & 3). Das Vorhandensein von Kupfer ist auch anhand der Geologie des Skeletts sichtbar. So finden sich Sekundärminerale wie Malachit und Azurit im Profil (Abb. 23), welche Verwitterungsprodukte von Kupfererzen sind. Zwar befindet sich der Standort bei Grands Esserts nach geologischer Karte auf autochthonem Dolomit. Jedoch kann hier davon ausgegangen werden, dass der Dolomit lokal fehlt oder mit Material der mylonitisierten Gneis- und Schieferzone aufgeschüttet worden ist. Weiter ist hier Magnetit mit dem Magnet-Test sehr einfach auffindbar.

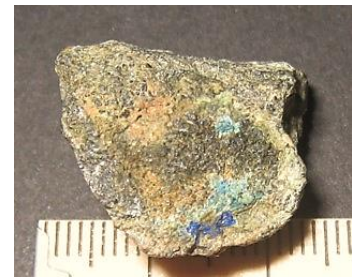


Abb. 23 Azurit (blau) und Malachit (türkis) von Grands Esserts (Foto: A. Berger)

Bis in 12 cm Tiefe liegt ein überschütteter, skelettarmes yAh-Horizont vor, wobei Moder festgestellt wird. Darauf folgt ein diffuser Übergang zu einem yCB-Horizont, welcher in 16 cm Tiefe das tiefste Wurzelvorkommen aufzeigt, was für einen flachgründigen Boden spricht. Ab 16-31 cm existiert ein aufgeschütteter yC-Horizont, welcher mit Salzsäure ein mässiges Schäumen zeigt. Dies schlägt sich auch im geschätzten Hellige-pH-Wert nieder, welcher oberhalb 16 cm im schwach sauren und unterhalb 16 cm im alkalischen Bereich liegt. Die Laborresultate in Tabelle 4 zeigen jedoch bereits im yCB-Horizont alkalische Bedingungen. Der Grund für die ausbleibende Salzsäurereaktion kann hier mit dem Vorhandensein von Dolomit erklärt werden, welcher langsamer reagiert.

4.2.9 Profil 9: Les Trappistes

Farbe Munsell	pH Hellige	CaCO ₃ [%]	Skelett [%]
2.5 Y 4/2	8	2-10	5-10
5 Y 4/2	7.5	2-10	5-10
5 Y 5/2	7.5	2-10	30
n. a.	n. a.	>10	60

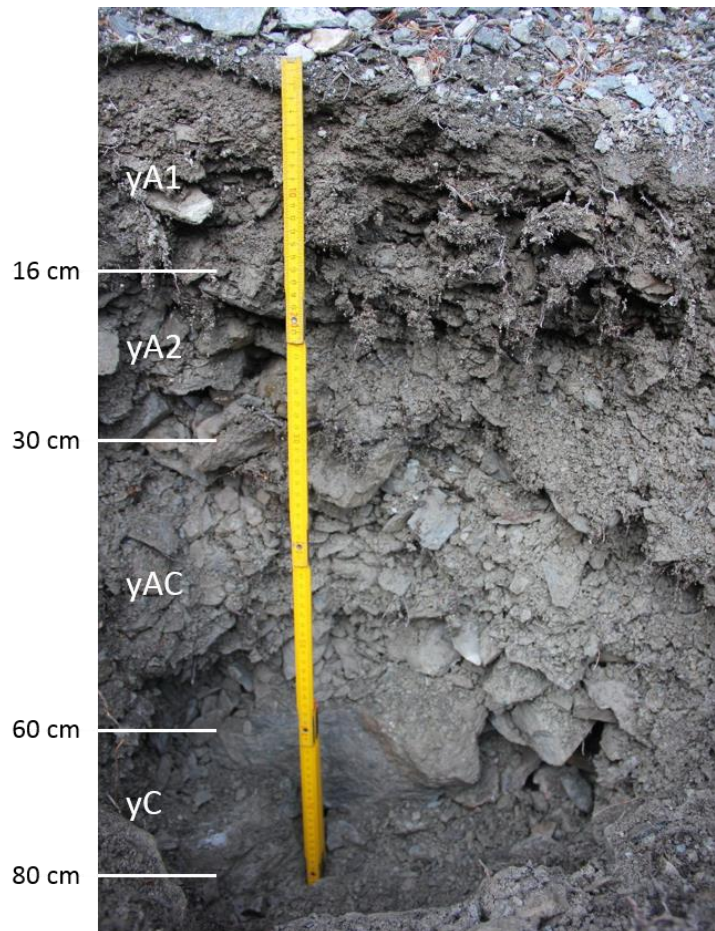


Abb. 24 Profilfoto und Bodenparameter bei Les Trappistes (Foto: A. Berger)



Abb. 25 Galenit- und Fluorit-Gesteinsproben von Les Trappistes (Foto: A. Berger)

Das am 29.10.2014 untersuchte Profil 9 (Abb. 24) bei Les Trappistes misst 80 cm Tiefe und liegt mit einer Neigung von 20° auf 699 m ü. M. in südlicher Exposition. Es handelt sich hier um eine sehr grossflächige Schutthalde, an deren Rand Mischwald vorhanden ist. Dieser Standort konnte aufwandbedingt nicht mit dem mobilen XRF-Gerät beprobt werden, was auch für Profil 10 und 11 gilt. Allerdings ist es ein Leichtes, in der Schutthalde von Les Trappistes Galenit (Abb. 25) aufzufinden, was hohe Bleiwerte voraussetzt.

Bei allen Horizonten handelt es sich um Aufschüttungen, wobei kein Humus feststellbar ist. Der Oberboden wird hier in zwei Unterhorizonte yA1 und yA2 unterteilt: yA1 reicht bis 16 cm und yA2 bis 30 cm Tiefe. Darauf folgt ein diffuser Wechsel zu einem Übergangshorizont yAC, welcher mit einem Skelettanteil von 30 % zwischen 30-60 cm liegt. In 60-80 cm Tiefe existiert der skelettreiche yC-Horizont. Das Profil ist mehrheitlich im schwach alkalischen Bereich gelegen, was die Laborwerte bestätigen (Tab. 4). Dies wird auch im Salzsäure-Test sichtbar, welcher eine mässige bis starke Reaktion mit Karbonat zeigt. Das tiefste Wurzelvorkommen befindet sich in 60 cm Tiefe, was wahrscheinlich auf die lockere Lagerung des Materials zurückzuführen ist.

4.2.10 Profil 10: Peiloz-1

Farbe Munsell	pH Hellige	CaCO ₃ [%]	Skelett [%]
5 YR 4/6	6	0	1
10 YR 3/4	7	0	25
5 Y 5/2	7	0	15
10 YR 4/6	7	0	3
2.5 Y 4/4	6.8	0	15
2.5 Y 3/3	7	0	30

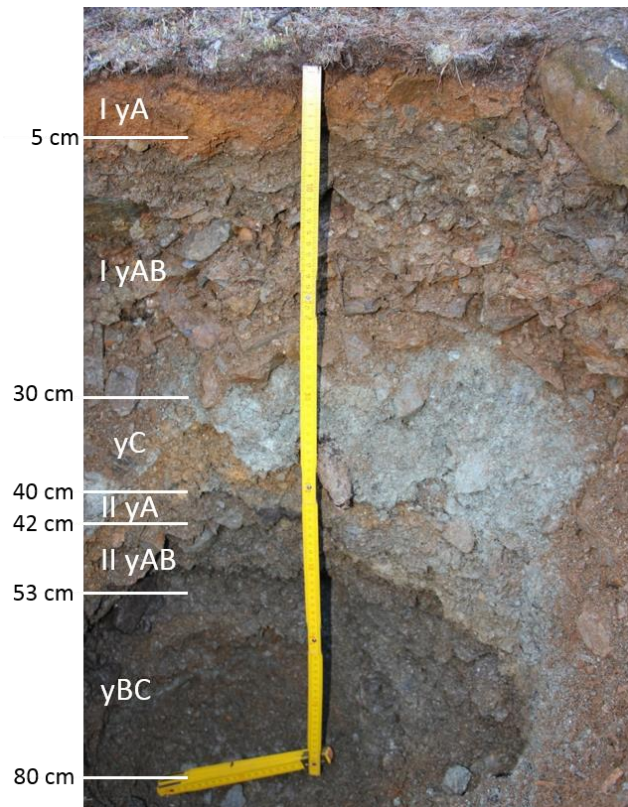


Abb. 26 Profilfoto und Bodenparameter bei Peiloz-1 (Foto: A. Berger)

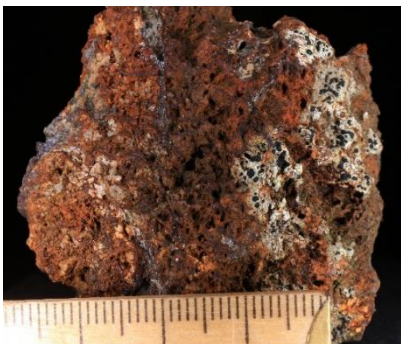
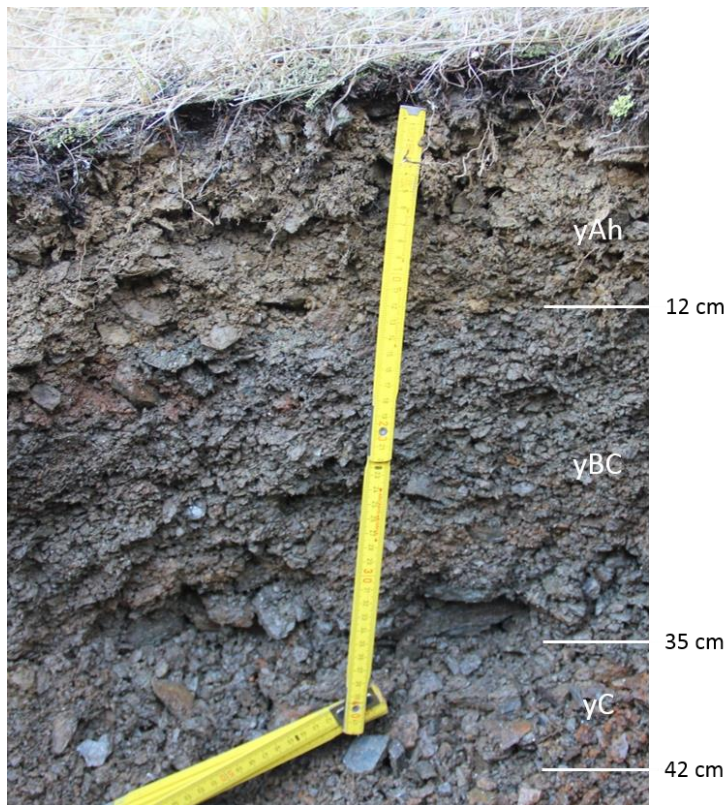


Abb. 27 Verwittertes Galenit-Bruchstück von Peiloz-1 (Foto: R. Widmer)

Die am 29.10.2014 untersuchte Schutthalde der Mine Peiloz befindet sich auf 1617 m ü. M bei Bruson im Val de Bagnes. Das 80 cm tiefe Profil 10 (Abb. 26) wurde bei 5° Hangneigung in nördlicher Exposition angelegt. Der angrenzende Wald besteht aus Nadelhölzern. Galenit findet sich im Schutthaldenmaterial nur bei gründlicher Reinigung der Bruchstücke, was auf eine hohe Verwitterung des Gesteins hinweist (Abb. 27).

Das Profil 10 ist von Aufschüttungen geprägt, wobei sich die Horizontabfolge im unteren Teil des Profils wiederholt und somit zwei Muttergesteins Horizonte yC und yBC existieren. Der skelettarme Oberboden I yA ist 5 cm mächtig und weist eine rot-gelbliche Farbe auf. Dessen geschätzter pH-Wert liegt im sauren Bereich, während der Labortest stark saure Bedingungen aufzeigt. In 5-30 cm Tiefe folgt der I yAB-Horizont mit einem geschätzten Skelettanteil von 25 %. In diesem Horizont können relativ gut erhaltene und wenig verwitterte Holzreste der früheren anthropogenen Nutzung aufgefunden werden. Zudem ist hier bei 20 cm das tiefste Wurzelvorkommen vorhanden. Zwischen 30-40 cm Tiefe existiert ein serizithaltiger yC-Horizont mit 15 % Skelettanteil, dessen Mächtigkeit im Profil variiert. Als Horizontwiederholung liegt in 40-42 cm Tiefe ein sehr geringmächtiger II yA-Horizont vor, welcher nur stellenweise sichtbar ist. Darunter folgt ein Übergangshorizont II yAB, bevor in 53-80 cm Tiefe der skelettreiche yBC-Horizont besteht. Humus ist in diesem Profil nicht feststellbar. Im Vergleich zu den Laborresultaten in Tabelle 4 sind die Hellige-pH-Werte generell überschätzt. Da in keinem Horizont Karbonat festgestellt wird, ist ein schwach saures Milieu naheliegender als ein alkalisches. Somit wird hier den Laborresultaten mehr Gewicht verliehen.

4.2.11 Profil 11: Peiloz-2



Farbe Munsell	pH Hellige	CaCO ₃ [%]	Skelett [%]
2.5 Y 4/4	7	0	15
2.5 Y 4/3	7.5	0	30
n. a.	7	0	50

Abb. 28 Profilfoto und Bodenparameter bei Peiloz-2 (Foto: A. Berger)

Das am 01.11.2014 erstellte Profil 11 (Abb. 28) ist zwar bei der gleichen Mine wie Profil 10 lokalisiert, jedoch handelt es sich hier um eine jüngere Schutthalde weiter oben im Gelände. Der Standort liegt bei 15° Neigung auf 1630 m ü. M. in nordwestlicher Exposition, wobei die Profiltiefe 42 cm misst. Hier ist im Schuttmaterial kein Galenit aufgefunden worden.

Nach einem 12 cm mächtigen yAh-Horizont folgt ein welliger Übergang zum aufgeschütteten yBC-Horizont. Letzterer liegt in 12-35 cm Tiefe und weist einen geschätzten Skelettgehalt von 30 % auf. Bei 35 cm Tiefe liegt einerseits das tiefste Wurzelvorkommen und andererseits die Horizontgrenze zum skelettreichen yC-Horizont. Die Humusform ist Mull. Auch für dieses Profil zeigen die Laborresultate (Tab. 3) für alle Horizonte schwach saure Bedingungen, während die Hellige-pH-Werte eher Überschätzungen darstellen. Die schwach sauren Werte der Laborresultate bestätigen sich auch im Nichtvorhandensein von Karbonat im verdünnten Salzsäuretest.

4.3 Laborresultate

4.3.1 Bodeneigenschaften

In der folgenden Tabelle 4 sind chemische und physikalische Eigenschaften der untersuchten Profile aufgeführt. Die nicht messbaren Proben (n.m) wie zum Beispiel bei Profil 4 (Skelett) werden der Vollständigkeit halber trotzdem aufgeführt, da sie in der XRD-Messung untersucht werden. Weiter konnte der nur lokal vorhandene Horizont II yA von Profil 10 (Peiloz-1) aufgrund seiner zu geringen Mächtigkeit im Labor nicht untersucht werden. Da es sich bei allen Profilen um Anthrosolesole handelt, welche auf Schutthalden von Minen lokalisiert sind, ist der Skelettgehalt entsprechend gross: Er variiert zwischen 31 % und 75 %. Die Munsell Bodenfarbe wurde im Feld in feuchtem Zustand bestimmt.

Tab. 4 Physikalische und chemische Eigenschaften der Fraktion <2 mm der untersuchten Böden beim Mont Chemin (n. m. = nicht messbar)

Profil	Horizonte	Tiefe [cm]	Munsell Farbe	Lagerungsdichte [g/cm ³]	Skelett [%]	pH (CaCl ₂)	C _{org} [g/kg]	N [g/kg]	C/N
Profil 1 Chez Larze III-1	yBC	0-10	10YR 4/3	1,32	39	4,8	23,2	4,85	4,8
	yBA	10-40	10YR 4/2	1,27	52	4,9	10,7	4,51	2,4
	bB	40-58	10YR 4/3	1,06	31	5,1	6,7	3,11	2,2
	bBC	>58	10YR 5/4	1,40	50	5,1	3,2	3,36	0,9
Profil 2 Chez Larze III-2	yA1	0-10	10YR 2/1	1,08	67	6,05	61,4	1,69	36,4
	yA2	10-20	2.5Y 3/2	1,34	72	6,7	31,7	4,19	7,6
	yA3	20-40	2.5Y 3/2	1,29	65	6,9	8,8	3,65	2,4
	C	40-60	2.5Y 4/1	1,57	69	6,9	5,0	4,07	1,2
Profil 3 Goilly	yA	0-8	10YR 3/2	1,00	66	4,8	66,8	6,34	10,5
	yB	8-28	10YR 5/3	1,27	61	4,6	15,9	3,90	4,1
	yBC	28-50	10YR 5/3	1,60	58	4,3	6,2	3,93	1,6
	bBA	50-56	10YR 5/3	1,34	55	4,1	13,2	3,80	3,5
Profil 4 La Crettaz-1	yA	0-10	2.5Y 4/3	1,00	51	5,3	28,2	4,18	6,7
	yC - 30cm	10-30	2.5Y 5/2	1,72	62	5,8	2,4	3,44	0,7
	yC - 50cm	30-60	2.5Y 5/2	1,60	68	5,95	2,9	3,19	0,9
	Skelett	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Profil 5 Couloir Collaud III	yCA	0-3	10YR 2/2	1,27	49	7,1	42,0	5,61	7,5
	yAC	3-13	10YR 3/2	1,55	74	7,25	32,3	3,03	10,6
	yC	13-43	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Profil 6 Chez Larze I	yAh - 8cm	0-8	10YR 3/2	1,05	36	4,85	32,3	5,46	5,9
	yAh - 16cm	8-16	10YR 3/2	1,49	68	6,1	7,7	3,55	2,2
	y(B)C	16-31	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Profil 7 La Crettaz-2	yC - 15cm	0-15	10YR 5/2	1,20	75	4,3	56,1	5,17	10,9
	yC - 30cm	15-40	10YR 5/2	1,32	75	4,2	46,4	4,72	9,8
Profil 8 Grands Esserts	yAh	0-12	10YR 3/2	1,30	58	6,2	16,3	3,77	4,3
	yCB	12-16	10YR 4/3	1,25	49	7,05	4,6	3,58	1,3
	yC	16-31	10YR 5/3	1,29	74	7,1	2,7	3,46	0,8
Profil 9 Les Trappistes	yA1	0-16	2.5Y 4/2	1,21	56	7,35	4,5	3,03	1,5
	yA2	16-30	5Y 4/2	1,42	67	7,3	2,3	3,36	0,7
	yAC	30-60	5Y 5/2	1,35	75	7,55	2,5	3,84	0,7
Profil 10 Peiloz-1	I yA	0-5	5 YR 4/6	1,09	39	3,8	11,3	3,91	2,9
	I yAB	5-30	10YR 3/4	1,43	72	5,6	<2,0	2,97	0,7
	yC	30-40	5Y 5/2	1,41	49	5,65	<2,0	3,53	0,6
	II yA	40-42	10 YR 4/6	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	II yAB	42-53	2.5Y 4/4	1,20	52	5,4	2,1	3,47	0,6
	yBC	53-80	2.5Y 3/3	1,34	65	5,8	<2,0	2,95	0,7
Profil 11 Peiloz-2	yAh	0-12	2.5Y 4/4	1,34	68	5,9	2,5	3,26	0,8
	yBC-20cm	12-35	2.5Y 4/3	1,35	68	6,1	2,8	3,35	0,8
	yBC-30cm	35-42	2.5Y4/3	1,45	75	6,1	<2,0	3,39	0,6

4.3.2 pH Messung

Die Mehrheit der untersuchten Profile liegt im sauren bis schwach sauren Bereich (Abb. 29). Beim Oberboden von Profil 10 sowie beim tiefsten Horizont von Profil 3 (Goilly) und Profil 7 (La Crettaz-2) können sogar stark saure Bedingungen gemessen werden. Weiter zeigen vier Profile neutrale bis schwach alkalische pH-Werte: Profil 2, 5, 8 und 9. Dabei lassen sich beim Profil 2 bei Chez Larze III-2 im Oberboden noch schwach saure Bedingungen feststellen, wobei der pH-Wert mit zunehmender Tiefe in den schwach alkalischen Bereich wechselt. Dieser Trend der Zunahme des pH-Werts mit der Tiefe gilt mit wenigen Ausnahmen für alle Profile. Einzig Profil 3 und 7 zeigen eine Abnahme des pH-Werts mit der Tiefe. Bei Profil 10 kann ausserdem in 47 cm Tiefe eine lokale Abnahme des pH-Werts festgestellt werden.

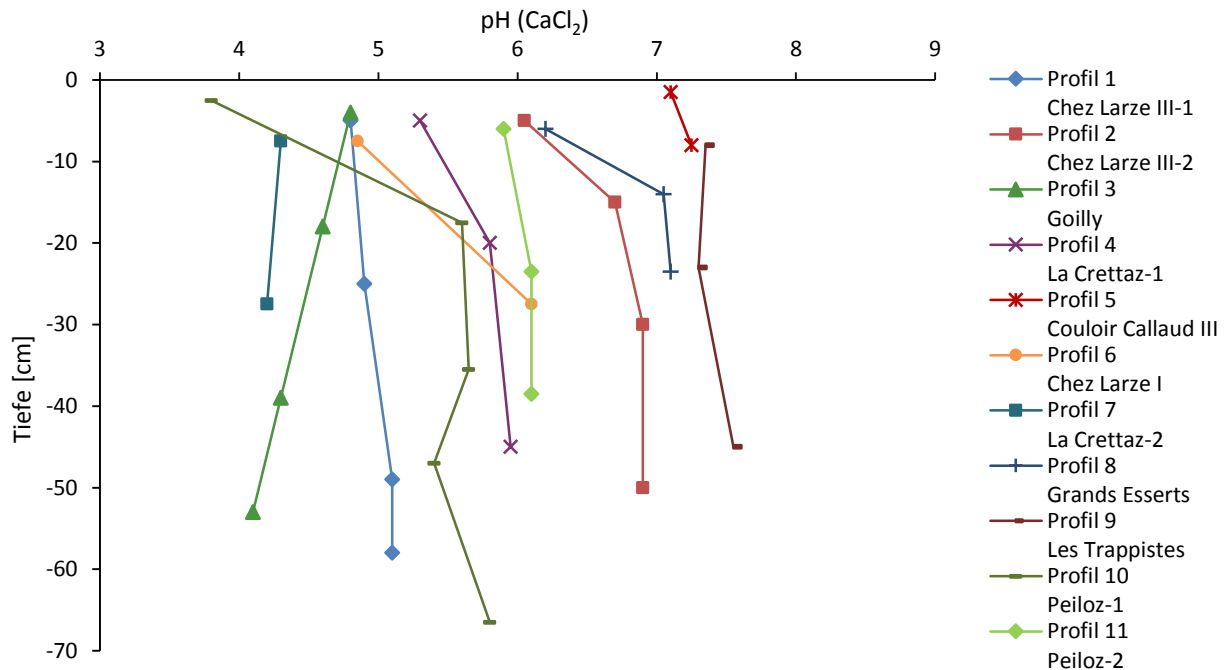


Abb. 29 pH-Werte (CaCl₂) in Zusammenhang mit der Profiltiefe

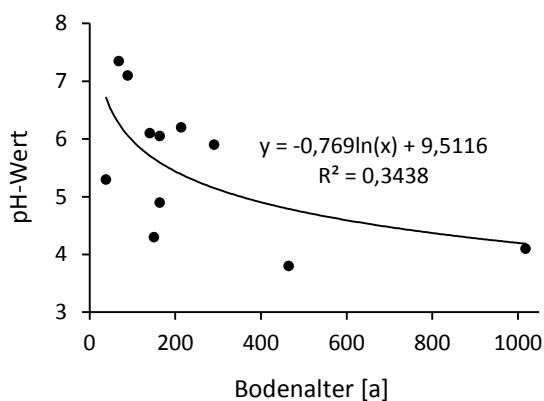


Abb. 30 pH-Wert des Bodens als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.

Bei der Bodenversauerung handelt es sich um einen natürlichen Prozess der Bodenentwicklung (Scheffer et al. 2010), weshalb der pH-Wert mit zunehmendem Bodenalter sinkt. Diesen Zusammenhang wird in Abbildung 30 dargestellt, indem die pH-Werte des Oberbodens in Abhängigkeit mit dem Bodenalter gesetzt werden. Zur Darstellung des Trends wird hier eine Logarithmusfunktion gewählt, wobei eine relativ hohe Streuung der Werte vorhanden ist.

4.3.3 CHN-Analyse

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff nimmt mehrheitlich mit der Profiltiefe ab (Abb. 31). Nur die Profile 9 und 10 bilden die Ausnahme, wo der C_{org} -Gehalt allerdings in nahezu allen Horizonten gering ist und teilweise sogar unter die Detektionsgrenze von 2 g/kg fällt. Die höchsten Werte sind im Oberboden vorhanden, wobei bei Profil 3 (Goilly) ein Maximalwert von 66.8 g/kg gemessen wird. In diesem Profil ist wie beim pH-Wert ein Ausreisser im untersten Horizont (bBA) vorhanden, der einen zunehmenden C_{org} -Gehalt zeigt. Das C/N-Verhältnis der Profile liegt zwischen 0.6 und 10.9, wobei nur im Oberboden von Profil 2 (Chez Larze III-2) eine höhere Verhältniszahl von 36.4 berechnet wird. Da zum Teil die Werte des organischen Kohlenstoffs wie erwähnt unterhalb der Detektionsgrenze des Geräts „CHN-Elemental Analyzer“ liegen, gilt es auch die C/N-Verhältniszahlen zu hinterfragen (vgl. Kap. 5.1).

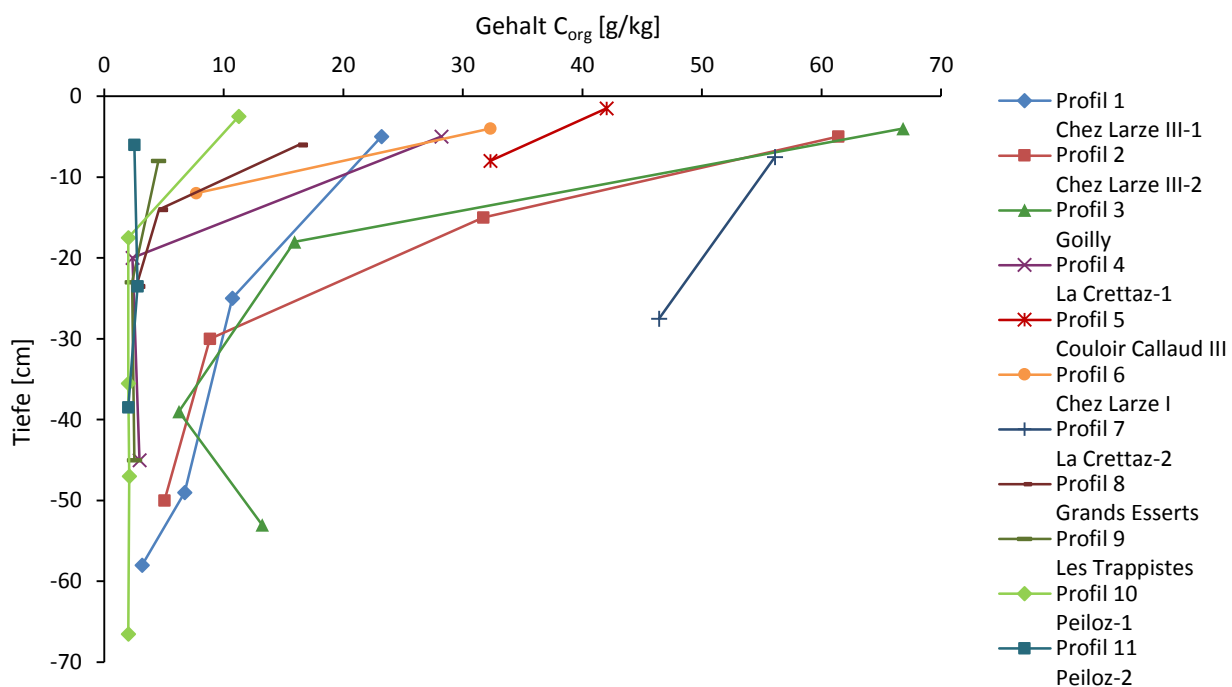


Abb. 31 Organischer Kohlenstoff in Zusammenhang mit der Profiltiefe

4.3.4 XRF Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Resultate der XRF Röntgenfluoreszenzanalyse werden für das Bodenmaterial in Anhang 2 und für das Skelett in Anhang 3 aufgeführt. Die Werte dienen später als Basis zur Berechnung der Verwitterungsindices in Kapitel 4.4. Bei den Resultaten wird sichtbar, dass manche Elemente wie zum Beispiel Hafnium, Antimon oder die Metalle der seltenen Erden nahe oder unter der Detektionsgrenze des Geräts liegen.

4.3.5 XRD Röntgendiffraktometrie

Das Bodenmaterial und das entsprechende Ausgangsgestein ist für jedes Profil mit der XRD-Analyse untersucht worden. Die Kalibrierung der Daten erfolgt anhand des signifikanten Quarz-Peaks. Jedes Profil zeigt ein Vorhandensein von primären Schichtsilikaten wie Biotit oder Muskovit. Oft ist auch deren Verwitterungsprodukt Vermiculit, ein Tonmineral, im Diffraktogramm erkennbar. Weiter dominiert Albit als Alkalifeldspat, wobei nur bei Profil 6 (Chez Larze I) Orthoklas vorliegt. In der Folge wird der Fokus auf bergbaurelevante Mineralien, auf deren Verwitterungsprodukte und auf Tonmineralien gelegt. Weitere Graphen sind in Anhang 4 aufgeführt.

4.3.5.1 Chez Larze

Die drei Profilstandorte bei Chez Larze zeigen alle ein Vorhandensein von Magnetit und Fluorit (Tab. 5). Der Gehalt an Tonmineralien variiert zwischen 1-2 % oder liegt bei Null. Bei Profil 6 (Chez Larze I) ist zudem Cobaltit im Oberboden sowie im Ausgangsgestein feststellbar. Dies entspricht insofern der Erwartung, da ein Vorkommen von Erythrin („Cobaltblüte“) im Stollen Chez Larze I existiert (Abb. 19).

Tab. 5 Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse beim Standort Chez Larze

Standort	Horizont	Magnetit [%]	Fluorit [%]	Cobaltit [%]	Vermicullit [%]
Profil 1	yBA	4	9	-	1
Chez Larze III-1	bBC	16	1	-	1
Profil 2	yA1	7	5	-	2
Chez Larze III-2	C	5	1	-	2
Profil 6	yAh-8cm	5	<1	2	1
Chez Larze I	y(B)C	23	1	2	-

Der Mengenanteil von Magnetit ist im Ausgangsgestein bei Profil 1 und 6 grösser als im Oberboden. Dies ist auch in Abbildung 32 ersichtlich, welche von Profil 1 bei Chez Larze III-1 einen Vergleich des Oberbodens mit dem Ausgangsgestein darstellt. Hingegen für Fluorit zeigt das Diffraktogramm im yBA-Horizont einen wesentlich höheren Gehalt als im Ausgangsgestein.

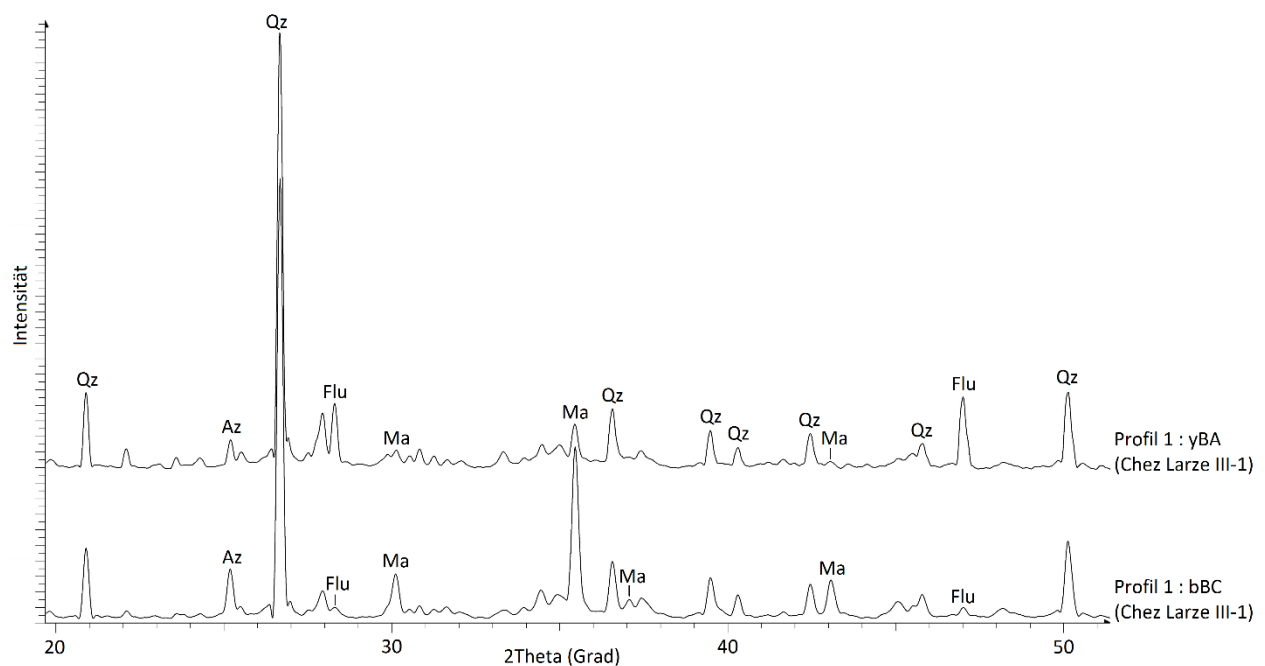


Abb. 32 XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden yBA mit dem Ausgangsgestein bBC von Profil 1 Chez Larze III-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Az = Azurit, Flu = Fluorit, Ma = Magnetit)

4.3.5.2 Goilly, Couloir Collaud III und Grands Esserts

Die XRD-Resultate für die Standorte Couloir Collaud III (Profil 5) und Grands Esserts (Profil 8) bestätigen das Vorhandensein von Magnetit (Tab. 6). Dieser ist bei Grands Esserts vorwiegend im Oberboden feststellbar, während er im Ausgangsgestein bei nur 1 % liegt. Weiter zeigen die Profile 5 und 8 einen Calcitgehalt von 10 % auf. Beim Standort Goilly können mit der XRD-Analyse keine nennenswerten Gehalte an bergbaurelevanten Mineralien bestimmt werden.

Tab. 6 Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse der Standorte Goilly, Couloir Collaud und Grands Esserts

Standort	Horizont	Magnetit [%]	Hämatit [%]	Fluorit [%]	Vermiculit [%]	Calcit [%]
Profil 3 Goilly	yA	1	1	1	-	-
	yBC	1	1	-	-	-
Profil 5 Couloir Collaud III	yCA	6	3	1	-	10
	yC	12	1	-	-	10
Profil 8 Grands Esserts	yAh	23	2	-	1	-
	yC	1	-	-	<1	10

4.3.5.3 La Crettaz und Les Trappistes

Die untersuchten Blei- und Zinkminen beim Mont Chemin zeigen alle hohe Fluorit-Werte bis zu 56 % (Tab. 7). Bei Profil 4 ist der Fluoritgehalt im Oberboden höher als im Ausgangsgestein, während sich die Werte bei den anderen Profilen jeweils in beiden Horizonten im ähnlichen Bereich bewegen. Weiter kann bei Profil 4 (La Crettaz-1) das Sekundärmineral Cerussit festgestellt werden.

Tab. 7 Quantifizierung von Mineralien-Gehalte der XRD-Analyse der Standorte La Crettaz und Les Trappistes

Standort	Horizont	Magnetit [%]	Fluorit [%]	Cerussit [%]	Calcit [%]
Profil 4 La Crettaz-1	yA	-	56	3	-
	Skelett	-	24	1	-
Profil 7 La Crettaz-2	yA1	-	30	-	-
	C	-	33	-	-
Profil 9 Les Trappistes	yA1	-	32	-	4
	yAC	1	34	-	-

Da bei den Standorten 4 und 7 bei La Crettaz davon ausgegangen werden kann, dass sie auf dem Material derselben Mine basieren, erfolgt ein Vergleich beider Profile im Diffraktogramm (Abb. 33). Dazu wird der yA-Horizont der jüngeren Ablagerung von La Crettaz-1 (1976) mit dem C-Horizont des älteren Standorts La Crettaz-2 (1864) gegenübergestellt. Dies veranschaulicht den ungefähr acht mal höheren Fluoritgehalt im Oberboden der jüngeren Ablagerung verglichen mit dem Ausgangsgestein der älteren Schutthalde.

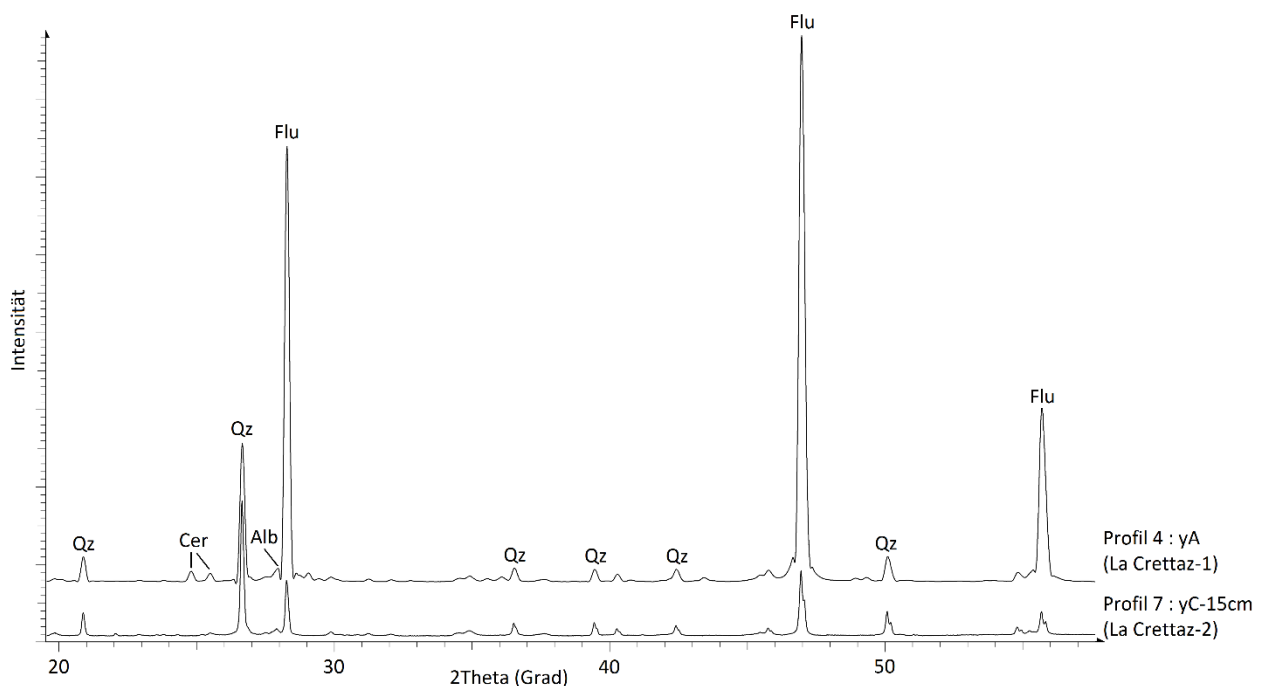


Abb. 33 XRD-Diffraktogramm: yA-Horizont von Profil 4 und yC-Horizont von Profil 7 bei La Crettaz (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Cer = Cerussit, Alb = Albit, Flu = Fluorit)

4.3.5.4 Peiloz

Das folgende Diffraktogramm (Abb. 34) zeigt einen Vergleich des Ausgangsmaterials yC mit dem Oberboden I yA beim Standort Peiloz-1 (Profil 10) im Val de Bagnes. Auffallend ist hier der hohe Gehalt des Sekundärminerals Anglesit, welcher im Oberboden bei 14 % liegt und im Ausgangsgestein nicht bestimmbar ist. Beim zweiten, jüngeren Profil Peiloz-2 wird hingegen kein Anglesit festgestellt.

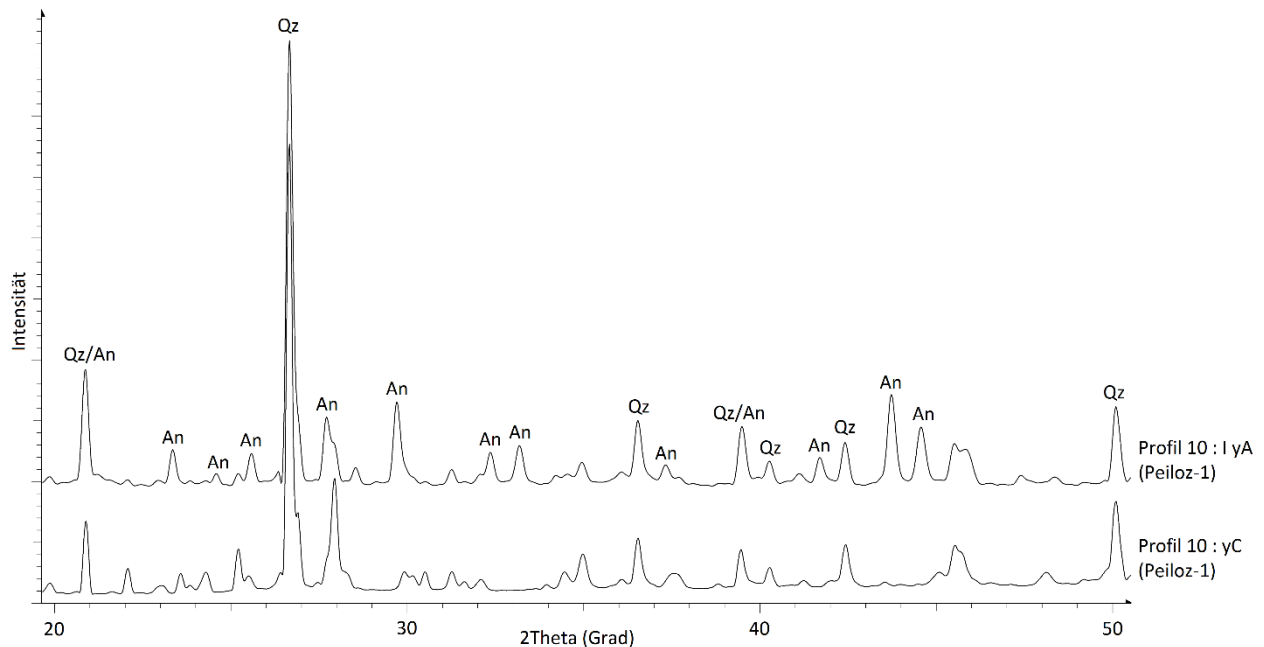


Abb. 34 XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden I yA mit dem Ausgangsgestein yC von Profil 10 Peiloz-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, An = Anglesit)

4.3.6 ^{14}C -Datierung

Der Standort Goilly stellt der einzige der untersuchten Standorte dar, welcher nicht anhand von Literaturangaben zeitlich eingeordnet werden kann. In diesem Profil sind allerdings im untersten Horizont bBA in 50-56 cm Tiefe Überreste von Holzkohle vorhanden, welche sich mit der Radiokarbonmethode datieren lassen. Die Resultate sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Holzkohle beim Standort Goilly kann somit auf 976-1017 J. n. Chr. datiert werden, was bezogen auf den Beprobungszeitpunkt 2014 ein durchschnittliches Alter von 1018 Jahren ergibt.

Tab. 8 Resultate der ^{14}C -Datierung von der Holzkohle bei Profil 3 Goilly

Standort und Horizont	Tiefe	^{14}C -Alter (unkalibriert)	$\delta^{13}\text{C}$	Alter AD (kalibriert)	\emptyset -Alter zum Beprobungszeitpunkt (2014)
Profil 3 Goilly bBA	50-56cm	1060 \pm 25	-26.6 \pm 1.0‰	976-1017 (1 σ -Bereich)	1018

4.4 Berechnung langzeitlicher Verwitterungsraten

4.4.1 Verwitterungsindices

Die Verwitterungsraten werden lediglich für den Oberboden dargestellt. Denn einerseits ist ein B-Horizont zur Analyse bei zu wenigen Profilen ausgeprägt und andererseits deutet sich im Unterboden der gleiche Verwitterungstrend wie im Oberboden an. Weiter weist das Skelett bei allen Indices denselben Trend wie das Feinmaterial auf, weshalb das Bodenskelett hier nur für den „Weathering Index of Parker“ WIP als Vergleich abgebildet wird (Abb. 38).

In den folgenden Graphen (Abb. 35-38) sind die Ergebnisse der berechneten Indices (K+Ca)/Ti, Index B und WIP für den Oberboden als Funktion der Zeit zusammengefasst. Dabei lassen sich die Verwitterungstrends mit der Potenzfunktion am besten darstellen. Wie in Kap. 3.4.1 erläutert gilt, je kleiner der Indexwert ausfällt, desto stärker verwittert ist der Boden. Entsprechend zeigen die Trends im Oberboden mit zunehmendem Bodenalter einen höheren Verwitterungsgrad. Weiter zeigt der WIP für das Bodenskelett den deutlicheren Trend im Vergleich mit dem Feinmaterial.

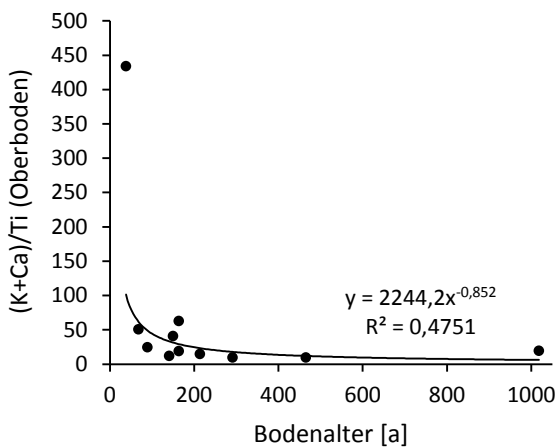


Abb. 35 (K+Ca)/Ti - Index für die Feinerde des Oberbodens

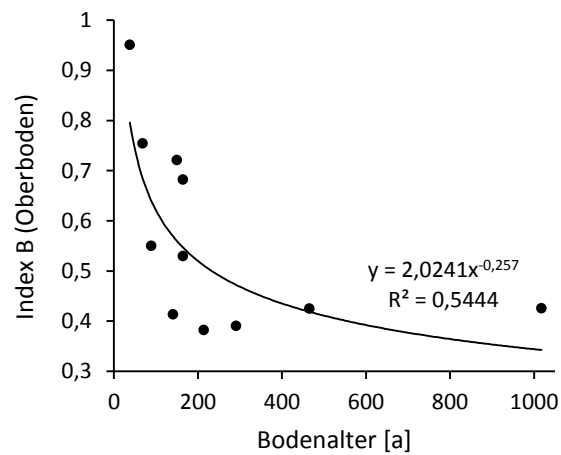


Abb. 36 Index B für die Feinerde des Oberbodens

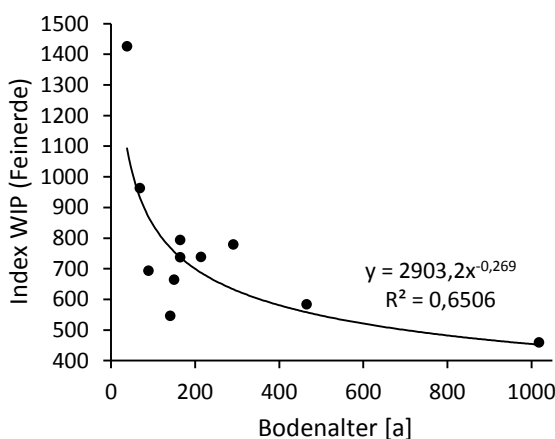


Abb. 37 Weathering Index of Parker WIP für die Feinerde des Oberbodens

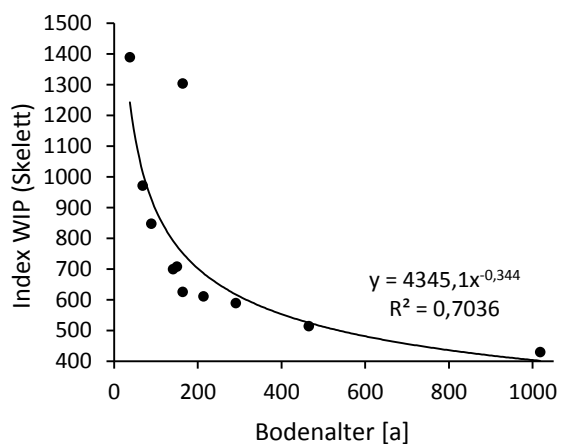


Abb. 38 Weathering Index of Parker WIP fürs Skelett des Oberbodens

Wie erwähnt, kann nach Chadwick et al. (1990) nebst Titan auch Zirkonium oder Vanadium als nahezu immobil betrachtet werden. Folgend wird mit Ti, Zr und V der Ratio mit einer Auswahl an mobilen Elementen gebildet. Diese Vorgehensweise lässt eine Interpretation über eine potentielle Abreicherung der mobilen Elemente zu, insbesondere wenn alle drei Verhältnisse einen ähnlichen Trend zeigen. Diese Annahme bestätigt sich speziell für die Base-Kationen (Na, Mg, K und Ca) (Abb. 39), was die Ergebnisse der zuvor besprochenen Indices unterstützt. Weiter zeigen auch die Elemente Chrom, Cadmium und Kupfer relativ zu den drei immobilen Elementen Ti, Zr und V einen geringeren Gehalt mit Zunahme des Bodenalters (Abb. 39). In Anhang 5 sind weitere Elemente relativ zu Ti, Zr und V dargestellt.

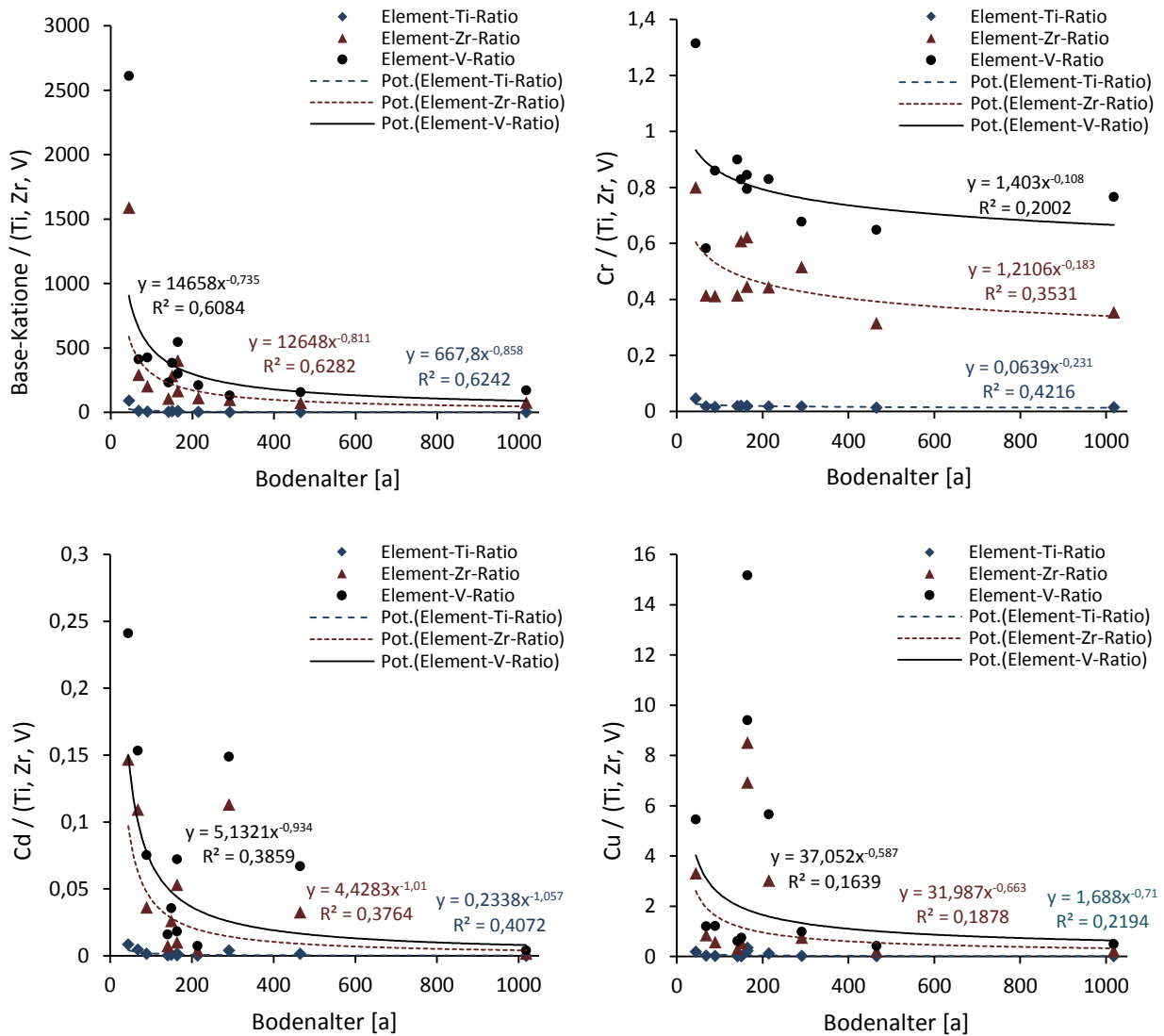


Abb. 39 Base-Kationen (Na, Mg, Ca, K), Chrom Cr, Cadmium Cd und Kupfer Cu relativ zu den immobilen Elementen Ti, Zr, und V als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.

4.4.2 Massenbilanz

Anhand des relativen Massenverlusts $\tau_{j,w}$ eines Elements kann der relative Eintrag und Austrag eines Schwermetalls über die Zeit untersucht werden (Dahms et al. 2012). Dabei äussert sich eine elementare Volumenabnahme durch negative Werte, während bei Resultaten im positiven Bereich von einem relativen Eintrag ausgegangen werden kann. So sollte infolge der Verwitterung in einem offenen System eine Abnahme des $\tau_{j,w}$ -Werts mit zunehmendem Bodentalter erfolgen (Dahms et al. 2012). Dieser Zusammenhang kann für die Feinerde des Bodens nicht gezeigt werden, da die Streuung der Daten zu hoch ist für eine statistische Aussage. Für das Skelett zeichnet sich jedoch für mobile Elemente wie Blei, Cobalt und Zink sowie für die Base-Katione (Na, Mg, Ca, K) ein relativer Austrag über die Zeit ab (Abb. 40). Dieser Trend wird durch die Logarithmusfunktion am besten dargestellt.

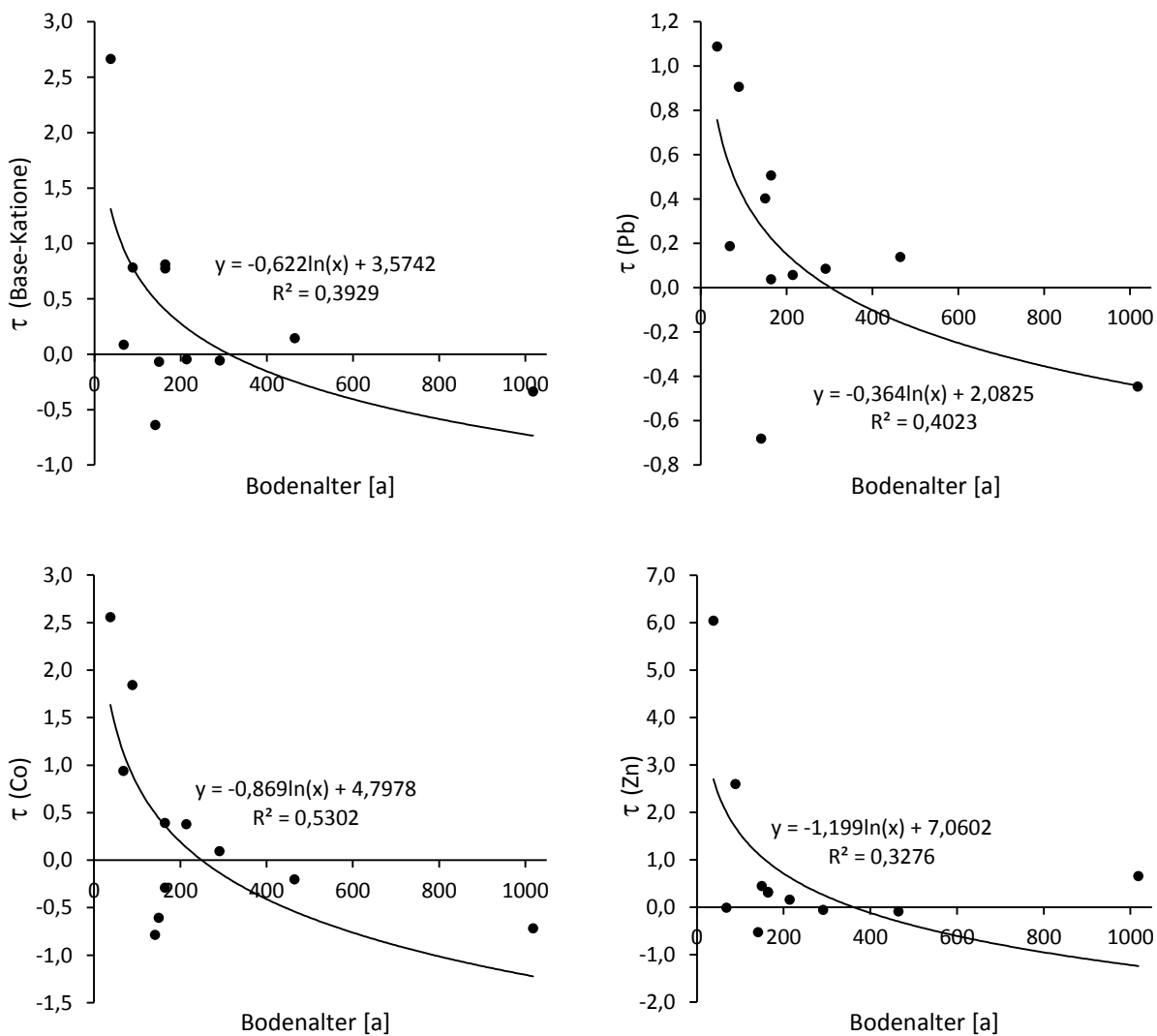


Abb. 40 Der relative Massenverlust $\tau_{j,w}$ im verwitterten Skelett für die Base-Katione (Na, Mg, Ca, K), Blei Pb, Kobalt Co und Zink Zn in Abhängigkeit des Bodentalters. Der Trend ist dargestellt mit der Logarithmusfunktion.

4.4.3 Kohlenstoffvorrat

Abbildung 41 zeigt für jedes Profil die Menge des organischen Kohlenstoffvorrats SOC_{Stock} in Abhängigkeit zum Bodenalter. Dabei resultiert eine hohe Streuung der Daten, wobei kein klarer Trend modelliert werden kann. Der Maximalwert zeigt Profil 7 (La Crettaz-2) mit einem Kohlenstoffvorrat von 6.4 kg/m^2 , während bei Profil 11 (Peiloz-2) mit 0.5 kg/m^2 die kleinsten Werte berechnet werden. Entsprechend dem Bodenalter von 1018 Jahren ist der Bestand an organischem Material bei Goilly mit 4.8 kg/m^2 relativ hoch. Weiter auffallend sind die Profile bei Chez Larze III, welche beide Werte im ähnlichen Bereich aufweisen.

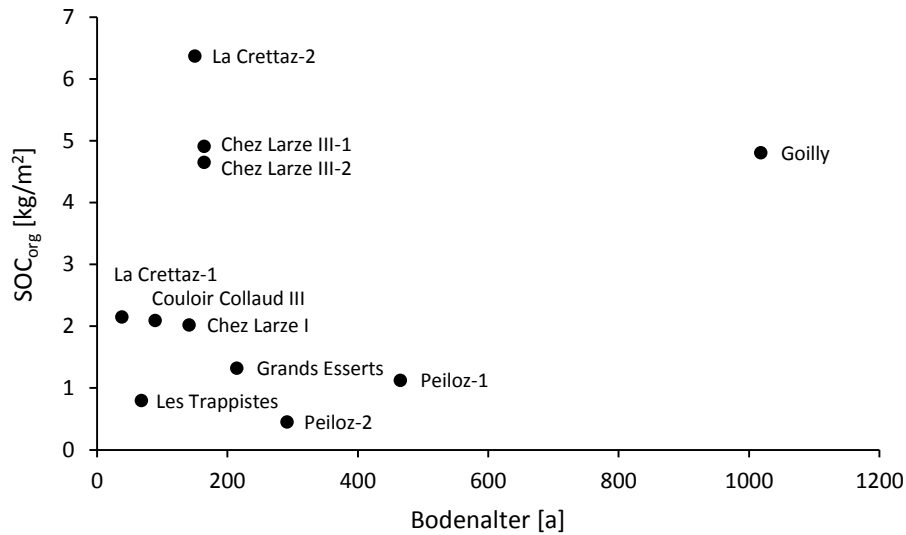


Abb. 41 Organischer Kohlenstoffvorrat SOC_{org} in Abhängigkeit des Bodenalters

4.5 Reaktivität

Chemische Prozesse wie Sorptions- oder Fällungsreaktionen resultieren über längere Zeiträume in einer natürlichen Demobilisierung von anorganischen Stoffen (Förstner & Grathwohl 2003). Dies führt in Kombination mit Bodenverfestigungsmechanismen und Ausfällungen im Porenraum mit zunehmendem Bodenalter zu einer geringeren Reaktivität der Schwermetalle (Förstner & Grathwohl 2003). Die Abnahme der Reaktivität geht mit einer wesentlichen Verminderung der Mobilität einher, weshalb gilt: Je geringer der Grad der Reaktivität eines Schwermetalls ist, desto kleiner ist das Mobilisierungspotential des Schadstoffs.

4.5.1 Reaktivität der Schweizer Minenstandorte

Die Standorte mit Blei- und Kupfer-Vorkommen werden unter Berücksichtigung der eruierten Indices nach Reaktivität klassifiziert (Tab. 9). So zeigt sich an der Massenbilanz von Blei (Abb. 40), dass der relative Eintrag des Elements während den ersten 100 Jahren am höchsten ist, was der Klasse „sehr stark reaktiv“ entspricht. Die Reaktivität sinkt gemäss der Trendlinie mit zunehmendem Bodenalter, wobei ab 400 Jahren lediglich von einer schwachen Reaktivität ausgegangen werden kann. Dieselbe Vorgehensweise erfolgt mit Kupfer, wobei sich hier anhand der Trendlinie in Abbildung 39 nur drei Klassen bilden lassen. Eine zusätzliche Gruppe wird unter „Restreaktivität“ ausgeschieden, wobei es sich um diejenigen Minenstandorte handelt, bei welchen in der SGK-Datenbank keine genaue Altersangabe über den Letztabbau existiert. Da solche Minen ein unbekanntes Potential zur Reaktivität darstellen, werden sie hier trotzdem berücksichtigt.

Tab. 9 Klassifizierung der Reaktivität von Blei und Kupfer unter Berücksichtigung der langzeitlichen Verwitterungsindices

<i>Reaktivität von Blei</i>		<i>Reaktivität von Kupfer</i>	
<i>Klasse</i>	<i>Alter des Letztabbaus</i>	<i>Klasse</i>	<i>Alter des Letztabbaus</i>
sehr stark reaktiv	0-100 Jahre	stark reaktiv	0-200 Jahre
stark reaktiv	100-200 Jahre	mittel reaktiv	200-400 Jahre
mittel reaktiv	200-400 Jahre	schwach reaktiv	> 400 Jahre
schwach reaktiv	> 400 Jahre	Restreaktivität	Alter unbekannt
Restreaktivität	Alter unbekannt		

Die folgenden Abbildungen 42 und 43 stellen die Ergebnisse kartographisch dar. Die untersuchten Minenstandorte beschränken sich auf den Alpenbogen, da im Jura kein silikatischer Untergrund existiert. Für das Vorkommen von Blei können insgesamt 105 und für Kupfer 119 Standorte vorwiegend in den Kantonen Wallis und Graubünden ausgewiesen werden. In der Region Malcantone im Tessin sowie im Kanton Uri existieren zudem lokale Häufungen von Minenstandorten.

Weiter ist darauf hinzuweisen, dass die Elemente bei manchen Standorten nicht als Hauptvorkommen, sondern in Form von Begleitmineralien der Eisenerz-Lagerstätten vorliegen. Es wäre jedoch ein Fehlschluss anzunehmen, dass dadurch mit einer geringeren Bodenbelastung zu rechnen ist, was am Beispiel der Eisenerzlagerstätte Grands Esserts (Profil 8) mit 7,7 g/kg Kupfer im Oberboden erkennbar ist (vgl. Anhang 2). Somit zeigen die Karten den Zeithorizont der Reaktivität von Blei oder Kupfer unabhängig von deren quantitativen Menge des Vorkommens.

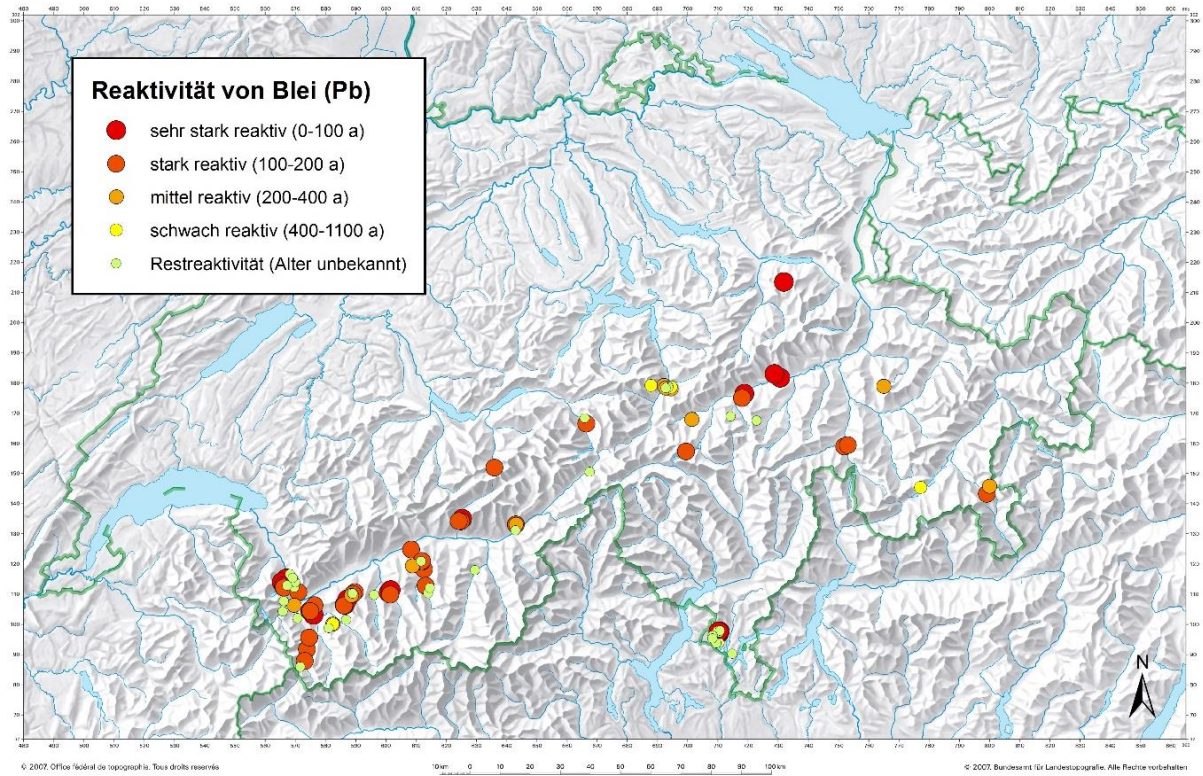


Abb. 42 Reaktivität von Blei bei historischen Minenstandorten der Schweiz (verändert, nach Swisstopo 2002)

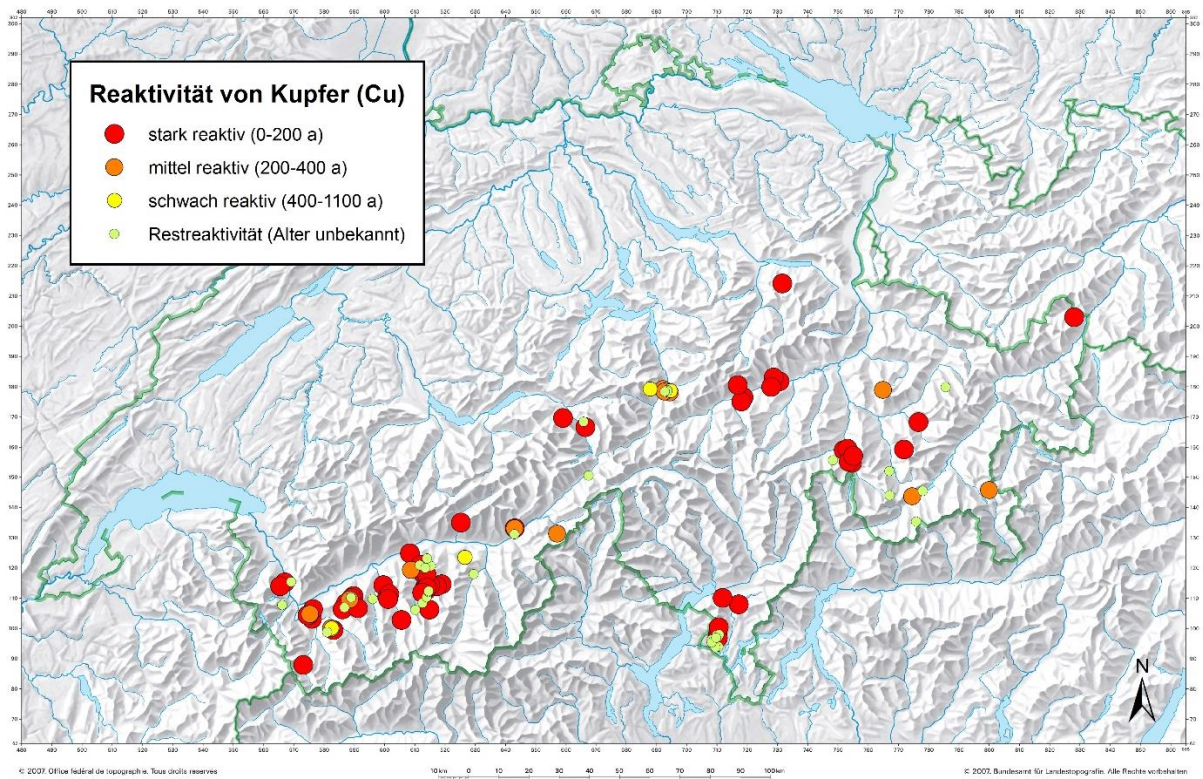


Abb. 43 Reaktivität von Kupfer bei historischen Minenstandorten der Schweiz (verändert, nach Swisstopo 2002)

4.5.2 Reaktivität der Minenstandorte bei Grundwasserschutzzonen und -arealen

Um mögliche Risiken für die Trinkwasserfassung und die Notwendigkeit weiterer Abklärungen aufzuzeigen, werden die Minen in Bezug auf Grundwasserschutzzonen und -areale untersucht. Der Fokus liegt auf den Standorten, welche sich inmitten oder bis in maximal 50 m Distanz von Grundwasserschutzzonen und -arealen befinden. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Grundwasserzone in einer Reichweite von 50 m von Minenschutthalden über den Niederschlag beeinflusst wird.

4.5.2.1 Lokalsituationen

Der Standort Peiloz (Profil 10 und 11) im Val de Bagnes erfüllt die oben erläuterten Bedingungen (Abb. 44). Hier zeigt sich, dass die „mittel reaktive“ Schutthalde bei Profil 11 in die Schutzzone S3 reicht, wobei das Wasser bei Eplane von einer öffentlichen Quelle gefasst wird. Ähnliche Verhältnisse zeigt auch die Mine „Praz Jean“ im Val Hérens (VS) (Abb. 45). Jedoch wird hier von einer sehr starken Reaktivität des Bleis ausgegangen, wobei ebenfalls eine öffentliche Quelle das Grundwasser fasst. Zudem fällt bei Abbildung 45 auf, dass zwei weitere Standorte in den Abflussrinnen kleinerer Fließgewässer lokalisiert sind, welche in den Vorfluter La Borgne entwässern. Weitere Lokalbeispiele sind im Anhang 6 aufgeführt.

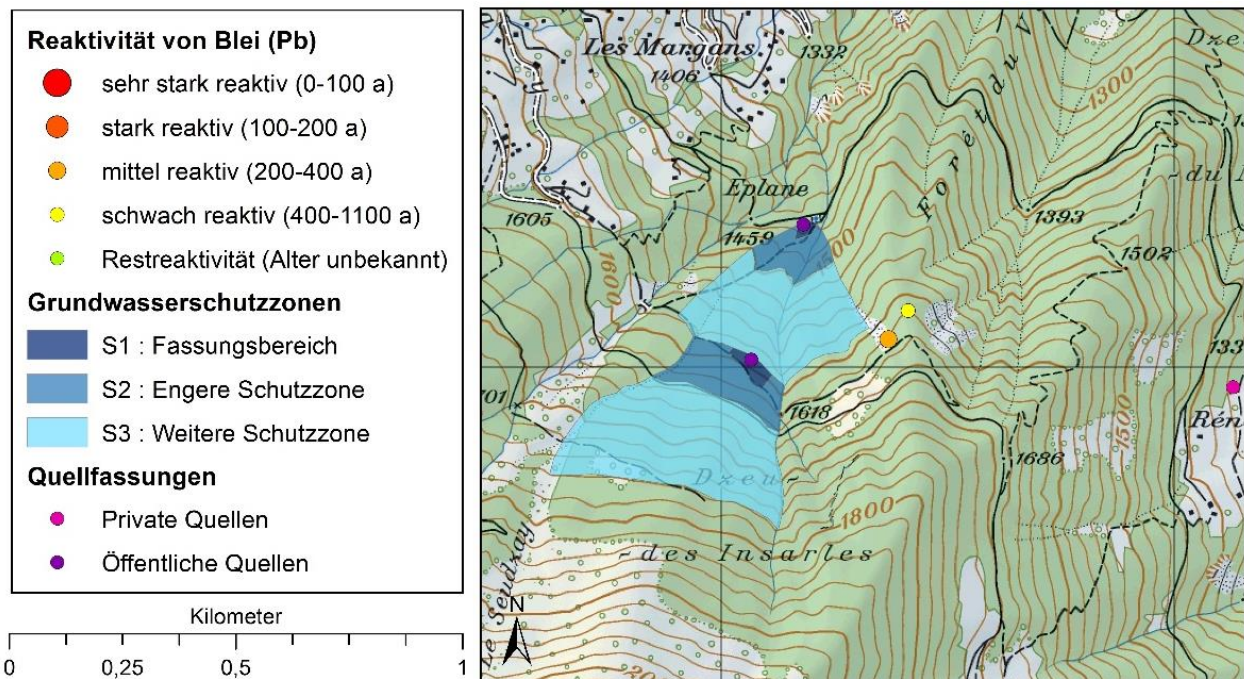


Abb. 44 Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Peiloz" (582'369/100'061) im Valle de Bagnes (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (verändert, nach Swisstopo WMS)

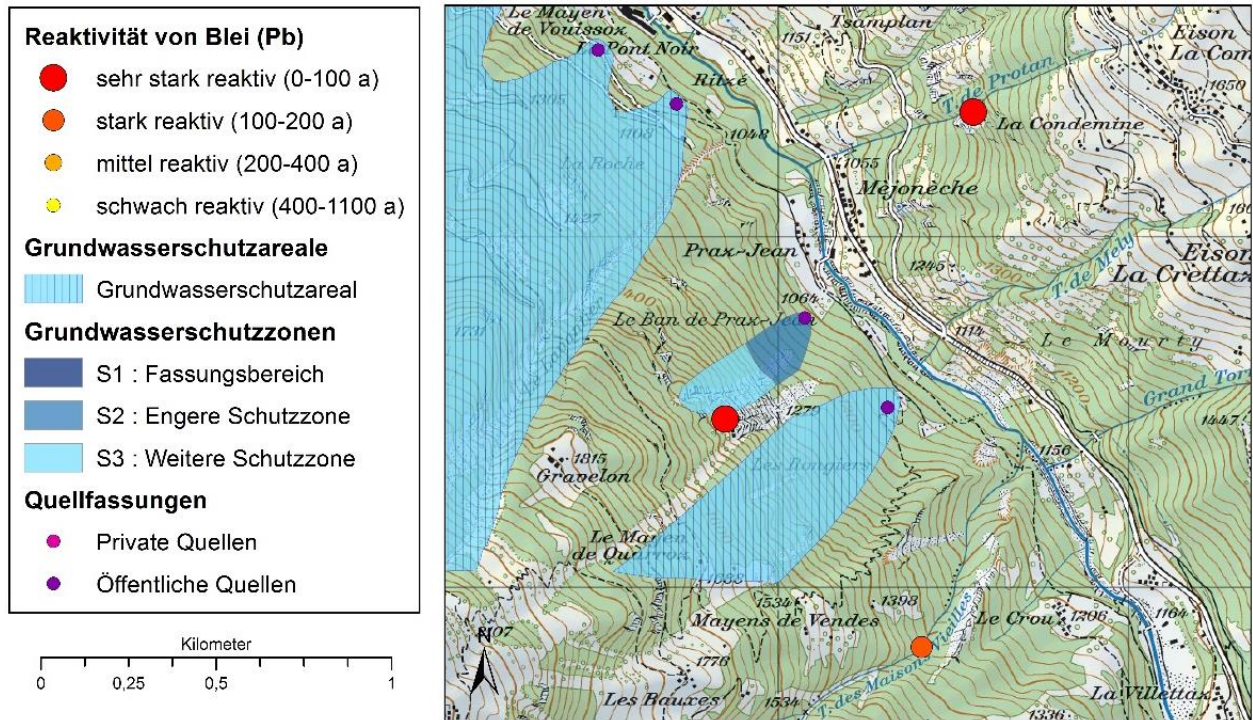


Abb. 45 Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Prax-Jean" (600'850/110'480) im Val d'Hérens (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)

4.5.2.2 Gesamtschweizerische Situation

Gleiche Bedingungen wie bei Peiloz liegen in der Schweiz nur in den Kantonen Wallis, Uri und Graubünden vor. Die Abbildungen 46 und 47 fassen die Standorte, welche in Grundwasserschutzzonen liegen, unabhängig von deren Reaktivität zusammen. Im Kanton Wallis sind es insgesamt acht Minen, während im Kanton Uri bei Gurnellen vier Standorte und ein weiterer im Vorderrheintal bei Trun im Kanton Graubünden auf silikatischem Untergrund liegen, welche nahe oder in Schutzzonen lokalisiert sind. Letztere Bedingungen erfüllen die zuvor erwähnten Minen im Gebiet Malcantone im Tessin nicht. Allerdings liegen diese oft nahe bei Fließgewässern, wodurch ein Schadstoff-Eintrag in die Umwelt erfolgen kann und somit solche Standorte nicht ausser Acht gelassen werden sollten.

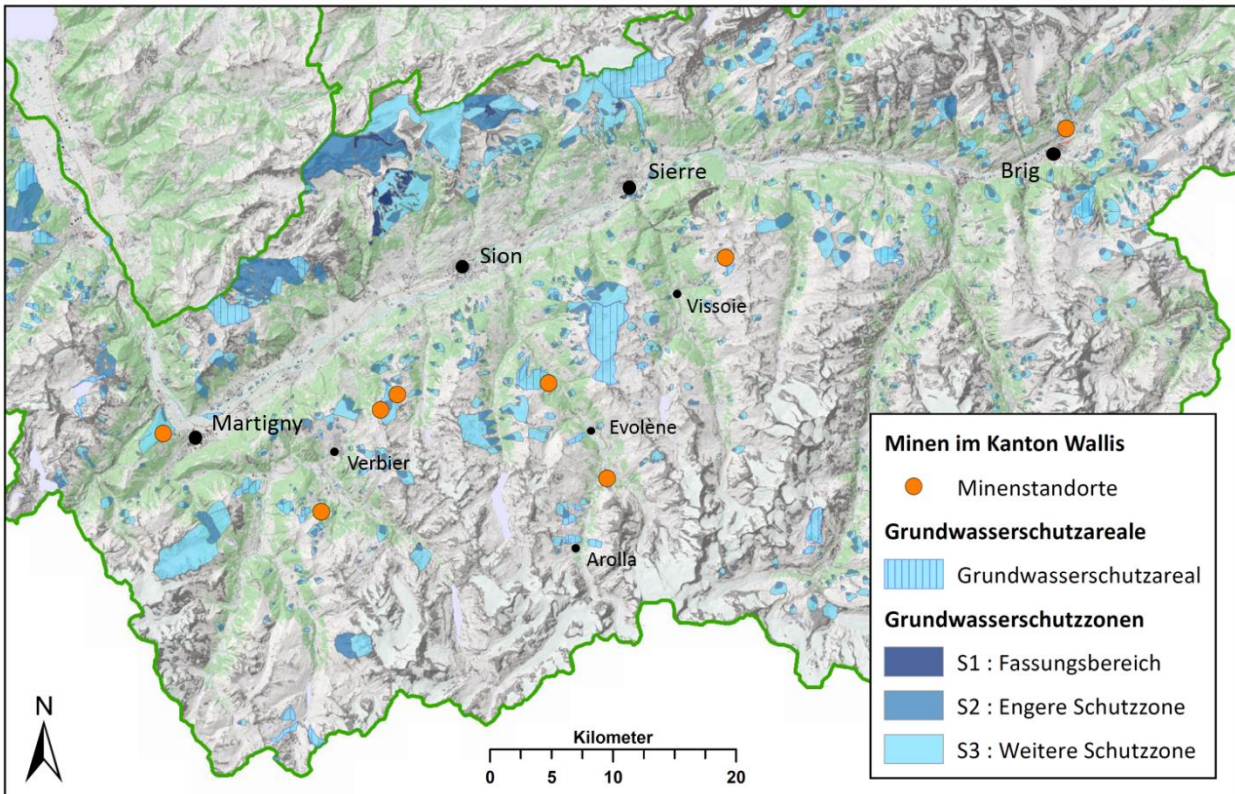


Abb. 46 Minenstandorte auf silikatischem Untergrund im Kanton Wallis, lokalisiert inmitten oder in max. 50 m Reichweite zu Grundwasserschutzzonen und -arealen (verändert, nach Swisstopo WMS)

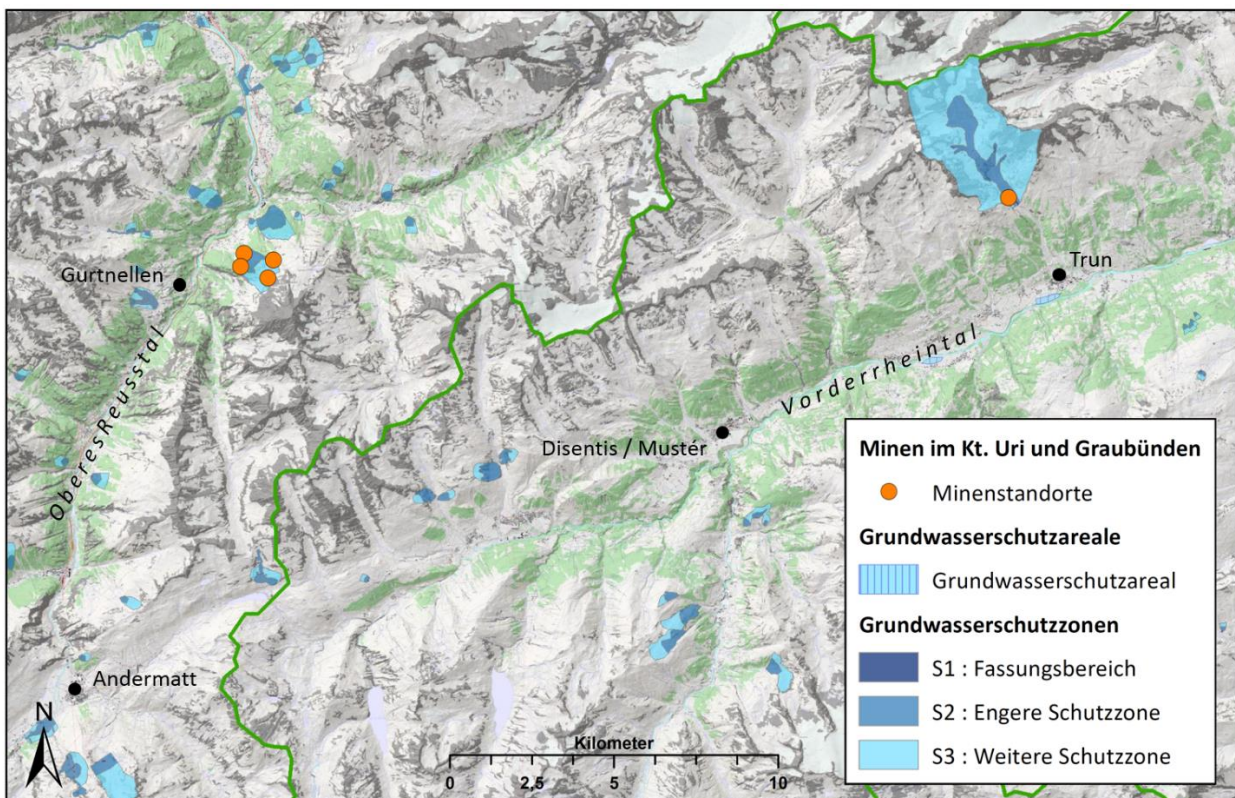


Abb. 47 Minenstandorte auf silikatischem Untergrund im Kanton Uri und Graubünden, lokalisiert inmitten oder in max. 50 m Reichweite zu Grundwasserschutzzonen und -arealen (verändert, nach Swisstopo WMS)

5 Diskussion

5.1 pH- und CHN-Analyse

Wie erwartet, liegt bei der Mehrzahl der Profile ein Trend der abnehmenden Acidität mit der Bodentiefe vor. Dies kann damit erklärt werden, dass im Oberboden diverse H^+ -Quellen existieren wie die Bodenatmung, Pflanzenwurzeln oder der Eintrag durch sauren Regen, während gleichzeitig die Basensättigung sinkt (Scheffer et al. 2010). Eine Ausnahme stellt das Profil 3 (Goilly) dar, welches eine Abnahme der Alkalität mit der Tiefe zeigt. Dies kann durch das Vorhandensein des begrabenen Horizonts bBA erklärt werden. Besass dieser zum Zeitpunkt der Überschüttung einen tieferen pH-Wert als das Aufschüttungsmaterial, resultiert eine Abnahme des pH-Werts mit der Tiefe. Dieselbe Erklärung gilt auch für die lokale Schwankung bei Profil 10 (Peiloz 1) in 47 cm Tiefe. So liegt die Vermutung nahe, dass der geringmächtige II yA-Horizont früher auf Terrain-Höhe lag und der Versauerung ausgesetzt war, bevor die letzte Überschüttung abgelagert wurde. Des Weiteren müssten ältere Profile eine höhere Bodenversauerung aufzeigen als jüngere, da die Bodenversauerung einen natürlichen Prozess der Bodengenese darstellt. Ein solcher Trend ist zwar feststellbar, allerdings scheint nebst dem Zeitfaktor auch das geologisch sehr heterogene Ausgangsmaterial einen starken Einfluss auf den Boden-pH zu nehmen, was die Streuung der Daten erklärt.

Die Abnahme des organischen Kohlenstoffs mit der Tiefe entspricht der Erwartung, da der Eintrag über die Oberfläche geschieht und die Umsetzung des organischen Materials hauptsächlich im Oberboden erfolgt. Der Ausreisser bei Goilly, der in 50-56 cm Tiefe nochmals eine Zunahme an C_{org} zeigt, bestätigt die Annahme, dass es sich hier um einen begrabenen Horizont handelt. Weiter können die tiefen Werte des C_{org} -Gehalts auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden. Erstens handelt es sich bei den untersuchten Standorten um eher junge Ablagerungen, die kaum eine Bodenbildung erfahren haben. Zweitens sind die Profile 9, 10 und 11 bei Les Trappistes und Goilly sehr exponiert gelegen und weisen ein Gefälle bis zu 20° auf, weshalb die Auswaschung und Erosion durch Niederschlag und Hangwasser entsprechend hoch sein dürfte. Bei diesen Profilen ist zudem der Eintrag von organischem Material eingeschränkt, da die Schutthalden kaum Vegetation aufweisen. Nicht zuletzt ist ein stark saures Milieu wie beim Profil 10 (Peiloz-1) für die Bodenorganismen und das Pflanzenwachstum lebensfeindlich, was der Humifizierung ebenfalls entgegenwirkt.

Das C/N-Verhältnis widerspiegelt das Mass von pflanzenverfügbarem Stickstoff sowie der Grad der Humifizierung: Je kleiner die Zahl ist, desto mehr Stickstoff wurde umgesetzt und umso fruchtbarer ist der Boden (Scheffer et al. 2010). In Anbetracht des geringen Zersetzungsgrads des organischen Materials zeigen Studien für alpine Böden weit höhere Werte für C/N-Verhältnisse als zehn (Merkli et al. 2009; Egli et al. 2010). Folglich sind die hier aufgeführten C/N-Resultate stark anzuzweifeln, da sie sich mehrheitlich zwischen 0.6 und 10.9 bewegen, jedoch Schutthalden nicht als fruchtbare Böden gelten können. Die zu tiefen Werte sind hauptsächlich damit zu erklären, dass die Detektionsgrenze für organischen Kohlenstoff erreicht wurde. Ein weiterer Faktor kann eine passive Anreicherung von Nitrat darstellen, wobei sich die funktionelle Gruppe NH_4^+ an die positiv geladene Oberfläche von Tonmineralien anlagert. Durch diese Fixierung des Ammoniums kann der Stickstoffgehalt bei tonigen Böden um mehr als 20 % ansteigen (Scheffer et al. 2010). Solche erhöhte Stickstoffwerte sowie nahe oder unter der Detektionsgrenze liegende Kohlenstoffgehalte dürften das C/N-Verhältnis wesentlich beeinflussen. Somit kann gezeigt werden, dass sich für die vorliegende Studie das C/N-Verhältnis bei Schutthalden nicht als Indikator für die Verfügbarkeit von Stickstoff eignet.

5.2 XRD-Analyse

5.2.1 Chez Larze

Die Diffraktogramme von Chez Larze bestätigen, dass es sich hier um eine ehemalige Eisenlagerstätte handelt. Das Ausgangsmaterial zeigt beim Standort Chez Larze I mit Werten bis zu 23 % relativ hohe Anteile an Magnetit. Diese Tatsache unterstützt die Aussage von Hugli et al. (1948), wonach bei der Mine Chez Larze I die Erze von zu geringer Qualität vom hochwertigen Material getrennt und auf der Schutthalde abgelagert wurden. Die tieferen Magnetit-Werte bei der Schutthalde des Profils Chez Larze III-2 zeugen von der geringeren Ausbeute des Standorts. Weiter weisen die Profile bei Chez Larze ein Vorhandensein von Vermiculit auf. Solche Tonminerale sind deshalb von Bedeutung, da sie nebst organischem Material wesentlich zur Adsorption von Ionen und Schwermetallen beitragen (Hirner et al. 2000).

Im Vergleich des Oberbodens mit dem Ausgangsgestein von Profil 1 zeigt sich ausserdem, dass Magnetit eher schwer löslich und beständig gegenüber der Verwitterung ist. Gerade umgekehrt verhält es sich mit Fluorit, welcher im Oberboden höhere Werte aufweist als im Ausgangsgestein. Dies bestätigt die Tatsache, dass Fluorit eine geringere Verwitterungsresistenz aufweist, wobei er beispielweise mit Schwefelsäure gelöst werden kann (Bishop et al. 1977). Somit kann gezeigt werden, dass bei einem Profialter von 142 Jahren (Chez Larze I) mit einer Verwitterung von Fluorit und einem erhöhten Fluoritgehalt im Bodenmaterial gerechnet werden muss.

5.2.2 Goilly, Couloir Collaud III und Grands Esserts

Auch hier bestätigen die hohen Magnetit-Werte die Literaturangaben, nach denen es sich bei Couloir Collaud III und Grands Esserts um Eisenerz-Abbaustandorte handelt (Ansermet 2001). Bei Goilly kann mit der XRD-Methode keine Aussage über die Abbaugrundlage gemacht werden. Allerdings liegt nahe des Standorts Goilly Hämatit aufgeschlossen, welcher ebenfalls eine Eisenquelle darstellt. Weiter fällt bei Grands Esserts auf, dass Magnetit nur im Oberboden feststellbar ist. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass es sich bei diesem Standort nicht um eine Schutthalde, sondern vielmehr um den Vorplatz einer ehemaligen Hütte handelt, deren Grundmauern noch immer sichtbar sind. Nicht zuletzt unterstützt das Vorhandensein von Calcit die Ergebnisse der pH-Analyse, wonach Couloir Collaud III und Grands Esserts sich vorwiegend im neutralen bis schwach alkalischen Bereich befinden. Derselbe Sachverhalt gilt auch für den Standort Les Trappistes.

5.2.3 La Crettaz und Les Trappistes

Wie erwähnt, zeigen die XRD-Resultate für diese Standorte sehr hohe Fluoritgehalte auf. Nach der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) wird Fluor als Schadstoff eingestuft, wobei ein Richtwert von 700 mg/kg gilt (Der Schweizerische Bundesrat 1998a). Eine Aussage bezüglich Richtwertüberschreitung bedingt allerdings eine andere Methodik zur Bestimmung des exakten Fluorgehalts, da die XRD-Analyse lediglich eine qualitative und halbquantitative Methode darstellt.

Im Vergleich der zwei Profile 4 und 7 bei La Crettaz fällt der rund acht Mal höhere Fluorit-Wert des jüngeren verglichen mit dem älteren Profil auf. Dies steht im Widerspruch damit, dass eine mehr als 100 Jahre ältere Schutthalde eigentlich die besseren Verwitterungsbedingungen aufweisen und dadurch höhere Gehalte zeigen müsste. Eine Erklärung dafür ist, dass beim jüngeren Standort mit einem Letztabbau von 1976 mehr Fluorit abgelagert wurde. Denn hier stellt die Ablagerung lediglich ein Produkt der Prospektionsarbeit dar, wobei keine Trennung zwischen qualitativ hochwertigem und minderwertigem Material stattgefunden hat, während es sich bei der älteren Schutthalde um aussortierte Gesteinsüberreste einer Abbautätigkeit handelt. Dieses Beispiel zeigt die Problematik bei der Vergleichbarkeit von Schutthalden-Standorten auf.

Selbst wenn davon ausgegangen werden kann, dass bei La Crettaz beide Profile auf dem Material derselben Mine basieren, spielt die Art der bergbaulichen Tätigkeit und der Aufbereitungstechnik eine wesentliche Rolle für den Mineraliengehalt im aufgeschütteten Bodenmaterial.

Obwohl es sich bei La Crettaz um Blei- und Zinklagerstätten handelt und bei der Feldarbeit Galenit aufgefunden worden ist, kann hier mit der XRD-Methode kein Bleiglanz festgestellt werden. Allerdings weist das Sekundärmineral Cerussit (Weissbleierz) bei Profil 4 auf das Vorhandensein von Blei hin. Dabei handelt es sich um ein Verwitterungsprodukt von Galenit, welches häufig bei Oxidationsstandorten von Bleilagerstätten entsteht (Bishop et al. 1977). Durch die Bildung von Cerussit wird die Aktivität von Blei in der Bodenlösung vermindert, wobei eine solche Mineraltransformation über einen längeren Zeitraum bis zur Immobilisierung von Blei führen kann (Scheffer et al. 2010). Bei einem eher geringen Mineralgehalt von maximal 3 % Cerussit kann bei La Crettaz-1 mit einem Letztabbau von 1864 von einer noch nicht vollständigen Mineraltransformation ausgegangen werden.

5.2.4 Peiloz

Der Standort Peiloz-1 (Profil 10) zeigt einen Mineralanteil von 14 % Anglesit. Letzterer gehört wie Cerussit zu den Sekundärmineralien, welche sich bei der Verwitterung von Galenit bilden (Bishop et al. 1977). Der hohe Gehalt an Anglesit weist auf eine fortgeschrittene Mineraltransformation hin, was die Aktivität von Blei in der Bodenlösung wesentlich verkleinert oder sogar verhindert. Daraus lässt sich ableiten, dass bei einem Bodentalter von 465 Jahren bei Peiloz-1 nahezu von einer Immobilisierung des mit Blei kontaminierten Bodens ausgegangen werden kann.

Im Vergleich mit dem Profil Peiloz-1 ist bei Peiloz-2 auffallend, dass hier mit einer letzten Abbautätigkeit im Jahr 1723 nicht ebenfalls Sekundärmineralien wie Cerussit oder Anglesit vorhanden sind. Dabei ist zu beachten, dass der Standort Peiloz-2 im ganzen Profil kaum organisches Material aufweist (Kap 4.3.3). Letzteres und insbesondere dessen Huminstoffe stellen jedoch eine wichtige Komponente dar, welche die Adsorption von Schwermetallen im Boden ermöglicht (Hirner et al. 2000). Der geringe Kohlenstoffanteil bei Peiloz-2 hängt hauptsächlich mit der grösseren Geländeneigung sowie der höheren Erosion und Auswaschung durch Hangwasser zusammen, was die Anreicherung von Sekundärmineralien somit vermindert.

5.3 ¹⁴C-Datierung

Die Holzkohle von Goilly wird auf 976-1017 n. Chr. datiert und ist dem Frühmittelalter zuzuordnen. Folglich stammt die untersuchte Grabenstruktur bei Goilly nicht aus der gleichen Zeit wie die in unmittelbarer Nähe abgelagerten Schlacken. Letztere sind auf 634-658 J. n. Chr. datiert (Serneels & Beck 1998) und stammen aus der Merowinger-Zeit. Ferner weist Ansermet (2001) darauf hin, dass die Entstehung der relativ grossen Mengen an Schlacken bei Goilly nicht auf dem lokalen Hämatit-Vorkommen basieren kann, welches dazu einen zu geringen Eisengehalt aufweist (Ansermet 2001). Eine Erklärung für den Zweck des untersuchten Grabens könnte somit sein, dass hier für eine kurze Zeit versucht wurde im Tagebau Eisenerz aus Hämatit zu gewinnen, was aber wegen des zu geringen Eisengehalts bald wieder aufgegeben wurde.

5.4 Verwitterungsindices

Die Trends zeigen erwartungsgemäss mit zunehmendem Alter eine stärkere Verwitterung des Oberbodens. Folglich kann von einer Auswaschung der mobilen Elemente in Abhängigkeit der Zeit ausgegangen werden. Gleichzeitig erhöhen sich die Konzentrationen der immobilten Elemente, was beim (K+Ca)/Ti-Index zu einer indirekten Anreicherung von Titan führt. Dieser Indikator zeigt den Zusammenhang am wenigsten deutlich auf, während der B-Index und der WIP (Weathering Index of Parker) offenbar stabilere Indikatoren gegenüber umweltbedingten Störfaktoren darstellen. Dabei zeigt der B-Index, dass ein stetiger Austrag der Base-Katione und gleichzeitig eine Anreicherung des als immobil betrachteten Aluminiumoxids erfolgten. Der Weathering Index of Parker WIP stellt die Beziehung zum Bodenalter am besten dar. Dies unterstützt die Angabe aus der Literatur (Price & Velbel 2003), wonach sich dieser Indikator für heterogenes Material besonders eignet. Es lässt sich zudem zeigen, dass beim WIP für das Skelett der bessere Trend resultiert als für das Bodenmaterial. Dies könnte darin gründen, dass der WIP ursprünglich für silikatisches Gestein anstatt für Bodenmaterial konzipiert wurde. Zusammenfassend kann bestätigt werden, dass sich die drei verwendeten Indices zur Beschreibung der langzeitlichen Verwitterung von Schutthalden eignen, wobei der WIP am aussagekräftigsten ist.

Die Resultate der Verhältnisse zwischen den mobilen und immobilten Elementen zeigen, dass mit zunehmendem Bodenalter geringere Gehalte an Chrom, Cadmium und Kupfer relativ zu den immobilten Elementen zu erwarten sind. Dabei ist hervorzuheben, dass die Aussagekraft dieser Methode erst dadurch gegeben ist, indem Titan, Zirkon und Vanadium alle denselben Trend zeigen. Dank diesem Umstand kann trotz tiefem Bestimmtheitsmass wie beispielsweise bei Kupfer eine Aussage bezüglich Abreicherungstrend der mobilen Elemente mit Zunahme des Bodenalters gemacht werden. Dennoch gilt es darauf hinzuweisen, dass für andere Elemente wie Blei nur schwach ausgebildete Trends erkennbar sind. Um die Aussagekraft weiter zu erhöhen, könnte auch Hafnium als immobiles Element zur Betrachtung hinzugezogen werden. Darauf wurde hier verzichtet, da die gemessenen Werte dieses Elements nahe der Detektionsgrenze liegen, was die Resultate verfälscht.

5.5 Massenbilanz

Mithilfe des Massenbilanz-Ansatzes wird die Chemie des Bodenprofils mit derjenigen des Ausgangsgesteins verglichen. Damit kann anhand immobilter Elemente wie Titan der relative Austrag im Zuge der Verwitterung über die Zeit aufgezeigt werden (Egli & Fitze 2000). Diese Methode bedingt, dass der Boden auf möglichst homogenem Ausgangsmaterial gebildet wurde (White 1995). Egli und Fitze (2000) weisen darauf hin, dass bei heterogenem, sedimentärem Untergrund die Massenbilanzierung mit mehr Fehlerpotential behaftet ist. Dabei wird vorgeschlagen, den am wenigsten verwitterten Horizont als Ausgangsgestein zu wählen (Egli & Fitze 2000). Trotz dieser Vorgehensweise zeigt sich, dass sich die Methode nicht für Böden eignet, welche auf Ausgangsgestein von anthropogen gebildeten Schutthaldendepositionen gebildet sind. Zu hoch ist hier die Heterogenität des Ablagerungsmaterials, während Übersättigungen und ausbeissende Schichten die Bodenbildung lokal sehr unterschiedlich beeinflussen. Daraus resultiert, dass in den Profilen oft nicht eindeutig ersichtlich ist, welches der Ausgangshorizont der Bodenbildung ist. Dies ist jedoch von zentraler Wichtigkeit für die Methode. Nicht zuletzt kann trotzdem gezeigt werden, dass der Ansatz zur Bestimmung der elementaren Volumenänderung für das Skelett angewendet werden kann. So können für einige Schwermetalle wie Blei, Kobalt und Zink mit Zunahme des Bodenalters langzeitliche Verwitterungstrends im Bodenskelett festgestellt werden.

5.6 Kohlenstoff-Vorrat

Durch den stetigen Eintrag an pflanzlichem Material durch die Vegetation wird mit zunehmendem Alter von einem Anstieg des organischen Kohlenstoff-Vorrats SOC_{Stock} im Bodenprofil ausgegangen. Die untersuchten Standorte zeigen keine Korrelation zwischen dem organischen Kohlenstoff-Vorrat und dem Bodenalter. Die lokal sehr unterschiedlichen Bedingungen und Umwelteinflüsse wie die Hangneigung oder die verfügbare Vegetation führen dazu, dass die gewählten Standorte nicht miteinander vergleichbar sind. Ferner weist auch die Studie von Goidts et al. (2009) darauf hin, dass die SOC_{Stock} -Methode mit Unsicherheiten behaftet ist. Denn jede Variable zur Berechnung des organischen Kohlenstoff-Vorrats wird beeinflusst durch Umweltfaktoren und Limitierungen der Messgeräte (Goidts et al. 2009). Letzteres gilt auch für die vorliegende Studie, da der gemessene organische Kohlenstoffanteil nahe oder unter der Detektionsgrenze liegt. Aus diesen Gründen eignet sich hier der SOC_{Stock} nicht als Indikator, um eine langzeitliche Entwicklung des organischen Kohlenstoff-Vorrats vorzunehmen.

Weiter entsprechen die hohen SOC_{Stock} -Werte beim Standort Goilly insofern der Erwartung, da es sich um das älteste der untersuchten Profile handelt. Zudem ist naheliegend, dass die zwei Profile bei Chez Larze III Werte im gleichen Bereich zeigen, weil sie gleichen Alters sowie nur wenige Meter voneinander entfernt sind und dadurch denselben Umweltbedingungen ausgesetzt sind.

5.7 Reaktivität

5.7.1 Reaktivität der Schweizer Minenstandorte

Bei der Untersuchung von Standorten mit ähnlichen Verhältnissen wie im Untersuchungsgebiet stellen sich diverse Schwierigkeiten. Die Erste liegt in der Bestimmung des geologischen Untergrunds. Dieser kann mithilfe des Kartenmaterials nicht immer eindeutig als silikatisch oder kalzitisch eingestuft werden, da beispielsweise Moränenmaterial je nach Ursprung der Komponenten aus unterschiedlichen Gesteinen besteht. Generell stellt sich die Frage, inwiefern der pH-Wert und somit die Reaktivität der Elemente tatsächlich vom Ausgangsgestein und nicht vom Ablagerungsmaterial selbst bestimmt wird. Oftmals enthalten die abgebauten Erze Sulfidminerale, wie zum Beispiel Pyrit, welche an der Tagesoberfläche im Zuge der Verwitterung mit Wasser und Sauerstoff zu Schwefelsäure reagieren (Förstner & Grathwohl 2003). Dieser Prozess erhöht die lokale Acidität erheblich und führt zur Sauerwasserbildung, welche primär für die erhöhte Mobilität der Elemente verantwortlich ist (Hirner et al. 2000). Ein Beispiel dafür ist die Schutthalde beim Minenstandort „Ochsenalp, Colm da Bovs“ (Koordinaten: 771'850/159'250). Anhand des Luftbilds können hier an der Oberfläche starke orange-gelbe Materialverfärbungen infolge chemischer Reaktionen festgestellt werden. Es stellt sich folglich die Frage, ob das mechanisch zerkleinerte und dadurch umso leichter verwitterbare Schuttmaterial nicht den grösseren Einfluss auf den lokalen pH-Wert hat als die Geologie, welche sich unter der Schuttablagerung befindet.

Weiter wird das Ausmass der Schadstoffquelle einerseits durch die Quantität der Schwermetalle im Gestein mitbestimmt. Andererseits spielt für das Belastungspotential auch das Volumen des abgelagerten Materials eine Rolle. Letzterer Aspekt wird zur Ermittlung der Reaktivität aufwandbedingt nicht berücksichtigt. Allerdings bietet eine volumenmässig grossräumige Schutthalde mehr Potential zur Sauerwasserbildung, was die Verwitterung begünstigt und somit die Reaktivität der Schwermetalle beeinflusst.

Eine wichtige Frage stellt sich bezüglich der Stabilität der immobilisierten Schwermetalle, welche eine schwache Reaktivität aufweisen. So zeigt zum Beispiel der Standort Peiloz nach mehr als 400 Jahren die Bildung des Sekundärminerals Anglesit und eine damit verbundene Abnahme der Reaktivität. Laut Förstner & Grathwohl (2003) haben Sekundärminerale eine bedeutende Funktion als „teils zeitlich befristete Senken von Acidität, Schwermetallen und Sulfat“ inne. Inwiefern die Stoffe jedoch langfristig immobilisiert

sind, hängt wesentlich von der Löslichkeit der Sekundärminerale ab. Die oftmals gute Löslichkeit mit Wasser führt dazu, dass die Schwermetalle remobilisiert werden und so wieder in den Umweltkreislauf gelangen können (Förstner & Grathwohl 2003). Da Anglesit als schwer lösliches Sulfat gilt, kann beim Standort Peiloz von einer längerfristigen Immobilisierung des Bleis ausgegangen werden. In der gesamtschweizerischen Betrachtung der Standorte muss jedoch betont werden, dass eine befristete Reaktivität von Schwermetallen untersucht wurde, wobei ein Zeithorizont von 400 Jahren in einer geologischen Betrachtung als kurzfristig gilt. Hingegen bedingt eine Studie über die langzeitliche Reaktivität von Schwermetallen eine detaillierte Analyse der lokalen Bedingungen und der Mineralogie des Schutthaldenmaterials. Weiter führt das Reaktivierungspotential von Sekundärminerale dazu, dass sich die Reaktivitätsanalyse für Sanierungsabklärungen wenig eignet, da eine schwach reaktive Mine durch eine potentielle Remobilisierung der Stoffe trotzdem ein Umweltrisiko darstellt. Dennoch wird in der Forschung das Potential der natürlichen Demobilisierung von Schadstoffen diskutiert, da sie in Kombination mit anderen Massnahmen eine kostengünstige Variante gegenüber anderen Methoden darstellt (Förstner & Grathwohl 2003). Ferner wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass das Risiko von Schadstoffen überschätzt wird, weil die sinkende Bioverfügbarkeit mit Zunahme der Lagerungsdauer nicht berücksichtigt wird (Alexander 2000).

Nicht zuletzt besteht in der Einteilung der Reaktivität in Klassen eine weitere Unsicherheit, da eine Klassifizierung immer auch eine Vereinfachung der Realität darstellt. Zwar dienen die Trends der Verwitterungsindices als Basis zur Bestimmung der Schwellenwerte, dennoch existiert hier ein gewisser Handlungsspielraum. Weil das kartographische Ergebnis je nach gesetzten Grenzwerten jedoch stark variieren kann, müssen die Klassen sorgfältig gewählt werden.

In Anbetracht dieser Überlegungen wird die Herausforderung deutlich, die Reaktivität der Schutthalden auf einer nationalen Skala konsistent einzuschätzen, da die lokal sehr unterschiedlichen Schwermetalltransformationen von einer Vielzahl von Umwelteinflüssen und komplexen Interaktionen von Prozessen beeinflusst werden. Somit stellt die kartographische Darstellung der Reaktivität der Schweizer Minenstandorte eine starke Vereinfachung dar. Dennoch visualisiert sie auf übersichtliche Art und Weise, wo in der Schweiz Bedarf an weiteren Untersuchungen und Forschungspotential besteht.

5.7.2 Reaktivität der Minenstandorte bei Grundwasserschutzzonen und –arealen

Belastete Waldstandorte, wie die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Minen, stellen laut VBBo (Stand 2012) (Der Schweizerische Bundesrat 1998a) aufgrund der Nutzungsart keine Umweltgefahr dar. Deshalb sind hierfür keine Prüf- oder Sanierungswerte für Schadstoffgehalte festgelegt. Beim Grundwasser handelt es sich hingegen um eine spezielle Nutzung, da eine Beeinträchtigung eine unmittelbare Gefahr für die Gesundheit des Menschen darstellt. Aus diesem Grund sind für den Grundwasserschutz in der Altlasten-Verordnung (AltIV, Stand 2015) (Der Schweizerische Bundesrat 1998b) entsprechende Richtlinien formuliert. Dabei werden die Bedingungen zur Überwachungsbedürftigkeit anhand der Chemie des Sickerwassers und der Belastung im Grundwasser definiert. Allerdings wird festgehalten, dass die Beobachtungspflicht eines Standorts je nach Entwicklung der Belastung auch entfallen kann. Dies ist der Fall, wenn „(...) nach mehrjähriger Überwachung fest[steht], dass aufgrund des Verlaufs der Schadstoffkonzentration und der Standorteigenschaften mit grosser Wahrscheinlichkeit kein Sanierungsbedarf (...) zu erwarten ist“ (Der Schweizerische Bundesrat 1998b).

Dieser Absatz der Altlasten-Verordnung ist zu hinterfragen unter Berücksichtigung des Zeithorizonts von mehr als 400 Jahren, in welchem eine Reaktivität der Schwermetalle vorhanden ist und Potential zur Remobilisierung der Elemente besteht. Folglich sind langfristige Monitoring-Programme bei belasteten Standorten entscheidend in Anbetracht der Bedeutung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung. In diesem Zusammenhang kann bei Minenstandorten in den Kantonen Wallis, Uri und Graubünden der Bedarf an weiteren Abklärungen im Sinne des Grundwasserschutzes aufgezeigt werden.

Ferner ist darauf hinzuweisen, dass in der Altlasten-Verordnung auch für oberirdische Gewässer Schutzbestimmungen existieren. Dementsprechend gilt ein weiteres Augenmerk auf Minenstandorte zu legen, die nahe der Abflussrinne eines Fließgewässers liegen, wie dies im Val Hérens (VS) der Fall ist (Abb. 45). Solche Standorte besitzen besonders ein Risiko für einen potentiellen Schadstoffaustrag in die Umwelt.

6 Schlussfolgerung

Dank frühem Interesse an den Bodenschätzen beim Mont Chemin existieren umfassende Literaturquellen und historische Schriften, welche Daten über die Abbaugeschichte bis zurück ins späte Mittelalter liefern. Die Datenbank der SGTk erweist sich hierbei als besonders wertvolle Grundlage zur Recherche. Folglich kann in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass sich die historischen Belege zur zeitlichen Einordnung der untersuchten Standorte eignen. Dies ermöglicht die Anwendung von langzeitlichen Verwitterungsindices, wobei sich ein Verwitterungstrend der Schwermetalle mit Zunahme des Bodenalters bestätigt. Mineraltransformationen infolge chemischer Reaktionen, wie zum Beispiel die Bildung von Sekundärmineralien, können mit den hier gewählten Methoden bei zwei Standorten (La Crettaz und Peilloz) aufgezeigt werden. Um in diesem Bereich mehr Erkenntnisse zu gewinnen, bedarf es einer detaillierteren mineralogisch-petrologischen Studie der untersuchten Böden.

Weiter wird deutlich, dass sich zur Untersuchung von Schutthalden der Ansatz der Massenbilanz nicht eignet. Dieser bedingt als Grundvoraussetzung ein homogenes Ausgangsmaterial, was bei Schutthalden nicht gegeben ist. Hier stellt die hohe Heterogenität bezüglich der Geologie und der anthropogenen Ablagerungsart eine zu grosse Fehlerquelle bei der Festlegung des C-Horizonts dar. Die Untersuchung der Verwitterung bergbaulicher Schutthalden bedingt somit die Verwendung von Verwitterungs-Indices, welche sich auch für heterogenes Ausgangsmaterial eignen. In der aktuellen Forschung ist die Anwendung von Verwitterungs-Indices sehr verbreitet, weshalb solche in einer Vielzahl vorliegen (Price & Velbel 2003; Munroe et al. 2007). Dementsprechend gilt es mit Bedacht, einen auf die lokalen Gegebenheiten angepassten und möglichst stabilen Indikator gegenüber Umweltfaktoren zu wählen.

Die Reaktivitätsanalyse zeigt, dass bei belastetem Schutthaldenmaterial bei einer Lagerungsdauer von weniger als 400 Jahren von einer sehr starken bis mittleren Reaktivität von Blei und Kupfer gerechnet werden muss, während diese Elemente bei mehr als 400 Jahren nur noch schwach reaktiv sind. Folglich wird eine kurzfristige, natürliche Immobilisierung der Elemente beschrieben. Unter einer langfristigen Betrachtung weisen immobilisierte Schadstoffe von geringer Reaktivität trotzdem die Möglichkeit zur Remobilisierung auf. Dadurch besteht auch bei Standorten von hohem Bodenalter langfristig ein Restpotential zur Reaktivität. Wird dies berücksichtigt, muss mit einem längerfristigen Zeitraum gerechnet werden, bis eine Schadstoffquelle ein Ökosystem nicht mehr beeinflusst. Zudem ist hier die Reaktivitätsanalyse nur für Blei und Kupfer angewendet worden. Bei anderen Schadstoffen wie Cadmium, Arsen oder Fluor ist aufgrund der limitierten Datengrundlage auf eine Studie verzichtet worden. Jedoch sind weiterführende Studien in Anbetracht der Toxizität solcher Elemente von grossem Interesse. Fluor stellt dabei ein besonderes Untersuchungspotential dar. Dieses liegt zu grosser Wahrscheinlichkeit infolge des Fluoritabbaus im letzten Jahrhundert als Belastung im Boden vor, kann jedoch mit den hier angewendeten Methoden nur qualitativ bis halb-quantitativ bestimmt werden.

Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse über die zeitliche Entwicklung von Schwermetallen auf andere Standorte der Schweiz ist mit diversen Schwierigkeiten und Vereinfachungen verbunden. Die grösste Unsicherheit besteht in der Vergleichbarkeit der Standorte, da lokal sehr unterschiedliche Verhältnisse existieren, welche alleine mit Literaturarbeit nicht berücksichtigt werden können. Exakte Aussagen bezüglich der Reaktivität anderer Standorte bedingt somit eine Feldbegehung sowie eine Laboruntersuchung, wie dies für die Standorte im Untersuchungsgebiet erfolgt ist. Dennoch dient die Reaktivitätskarte der Schweizer Minenstandorte als Basis zur Aufdeckung von stark bis schwach reaktiven Standorten und zeigt Potential für weitere Abklärungen aus Sicht des Umweltschutzes auf. Dabei besteht besonderer Beobachtungsbedarf bei bergbaulichen Abfällen in Grundwasserschutzzonen. Denn je nach Löslichkeit der

Mineraltransformationen können langfristig auch schwach reaktive Schadstoffe infolge chemischer Reaktionen wieder mobilisiert werden. Deshalb und in Anbetracht der teils hohen Toxizität der Schadstoffe ist ein langfristiges Monitoring-Programm bei solchen Standorten empfehlenswert. Ferner birgt die Einwirkung belasteter Bergbaustandorte auf Fließgewässer und die räumliche Reichweite solcher Schadstoffquellen weiteres Untersuchungspotential.

Quellenverzeichnis

- Alexander, M. (2000). Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants. *Environmental Science and Technology*, 34, 4259-4265.
- Ansermet, S. (2001). *Le Mont Chemin. Mines et minéraux du Valais*. Sion: Musée cantonal d'histoire naturelle.
- Ansermet, S., & Meisser, N. (1996). Travaux préliminaires sur la mine d'argent de Peiloz, Bruson, Val de Bagnes. *Minaria Helvetica : Zeitschrift Der Schweizerischen Gesellschaft Für Historische Bergbauforschung SGHB*, 16a, 61-67.
- Beckhoff, B., Kanngiesser, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Berlin: Springer.
- Bishop, A. C., Hamilton, W. R., & Woolley, A. R. (1977). *Der Kosmos-Steinführer*. Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung.
- Brimhall, G. H., & Dietrich, W. E. (1987). Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 51, 567-587.
- Chadwick, O. A., Brimhall, G. H., & Hendricks, D. M. (1990). from a black to a grey box - a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, 3, 369-390.
- Dahms, D., Favilli, F., Krebs, R., & Egli, M. (2012). Soil weathering and accumulation rates of oxalate-extractable phases derived from alpine chronosequences of up to 1Ma in age. *Geomorphology*, 151-152, 99-113.
- Der Schweizerische Bundesrat. (1998a). Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), vom 1. Juli 1998 (Stand am 1. Juni 2012), 814.12, 1-12.
- Der Schweizerische Bundesrat. (1998b). Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV), vom 26. August 1998 (Stand am 1. März 2015), 814.680, 1-18.
- Eggenberger, U. (1995). Mineral weathering in soils: experiments, field studies, and modeling. *Ph.D. Thesis, Universität Bern, Schweiz*.
- Egli, M., & Fitze, P. (2000). Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements: a revision. *Soil Science*, 165, 437-443.
- Egli, M., Mirabella, A., & Sartori, G. (2008). The role of climate and vegetation in weathering and clay mineral formation in late Quaternary soils of the Swiss and Italian Alps. *Geomorphology*, 102, 307-324.
- Egli, M., Sartori, G., Mirabella, A., Giaccari, D., Favilli, F., Scherrer, D., Krebs, R., Delbos, E. (2010). The influence of weathering and organic matter on heavy metals lability in silicatic, Alpine soils. *Science of the Total Environment*, 408, 931-946.

- Egli, M. et al., (2011). Heavy metal contamination in soils near formerly mined metal ores of the Mont Chemin. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz. Bulletin*, 31, 51-56.
- FAL, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (1997). *Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden FAL 24*. Zürich-Reckenholz.
- Förstner, U., & Grathwohl, P. (2003). *Ingenieurgeochemie : Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen*. Berlin: Springer.
- Ghassemi, M., Fargo, L., Painter, P., Quinlivan, S., Scofield, R., & Takata, A. (1981). Feasibility of Commercialized Water Treatment Techniques for Concentrated Waste Spills. *TRW Environmental Engineering Division, PB82-10844*.
- Gnägi, C., & Labhart, T. P. (2015). *Geologie der Schweiz*. Bern: Ott Verlag.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., & Crucifix, M. (2009). Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *European Journal of Soil Science*, 60, 723-739.
- Guénette-Beck, B., Meisser, N., & Curdy, P. (2009). New insights into the ancient silver production of the Wallis area, Switzerland. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1, 215-229.
- Harrington, C. D., & Whitney, J. W. (1987). Scanning electron microscope method of rock-varnish dating. *Geology*, 15, 976-970.
- Hirner, A. V., Rehage, H., & Sulkowski, M. (2000). *Umweltgeochemie. Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Pedosphäre*. Darmstadt: Steinkopff.
- Hugi, E., Huttenlocher, H. F., Gassmann, F., & Fehlmann, H. (1948). Die Magnetit-Lagerstätten. In *Die Eisen- und Manganerze der Schweiz*. Bern: Kümmerly & Frey.
- Jäger, H., Achermann, M., Waroszewski, J., Kabała, C., Malkiewicz, M., Gärtner, H., Dahms, D., Krebs, R., Egli, M. (2015). Pre-alpine mire sediments as a mirror of erosion, soil formation and landscape evolution during the last 45 ka. *Catena*, 128, 63-79.
- Kronberg, G. I., & Nesbitt, H. W. (1981). Quantification of weathering of soil chemistry and soil fertility. *Journal of Soil Science*, 32, 453-459.
- Labhart, T. P. (2007). Geologie – 500 Millionen Jahre Erdgeschichte. In *Welt der Alpen – Erbe der Welt*. Bern: Haupt Verlag.
- Mavris, C., Egli, M., Plötze, M., Blum, J. D., Mirabella, A., Giaccai, D., & Haeberli, W. (2010). Initial stages of weathering and soil formation in the Morteratsch proglacial area (Upper Engadine, Switzerland). *Geoderma*, 155, 359-371.

- Merkli, C., Sartori, G., Mirabella, A., Egli, M., Mancabelli, A., & Plötze, M. (2009). The soils in the Brenta region: chemical and mineralogical characteristics and their relation to landscape evolution. *Studi Trentini di Scienze Naturali*, 85, 5-20.
- Meteo Schweiz (2014). Klimadiagramm von Fey 1961-1990. <<http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klimanormwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html>> (Zugriff: 11.06.2015)
- Munroe, J. S., Farrugia, G., & Ryan, P. C. (2007). Parent material and chemical weathering in alpine soils on Mt. Mansfield, Vermont, USA. *Catena*, 70, 39-48.
- Parker, A. (1970). An index for weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107, 129-147.
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J., & Jordan, T. H. (2008). *Allgemeine Geologie*. Berlin Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202, 397-416.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knaber, I., Kretschmar, R., Thiele-Bruhn, S. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Serneels, V., & Beck, B. (1998). Les scories de Mont Chemin et l'utilisation de la magnetite pour fabriquer de fer par la methode directe de reduction. *Minaria Helvetica : Zeitschrift Der Schweizerischen Gesellschaft Für Historische Bergbauforschung SGHB*, 18b, 43-65.
- Swisstopo Bundesamt für Landestopographie (2002). Landeskarte 1:100'000. (Zugriff: 24.04.15).
- Swisstopo Bundesamt für Landestopographie (2007). Topographische Karte. Geoportal des Bundes. <map.geo.admin.ch> (Zugriff: 01.09.14).
- Swisstopo Bundesamt für Landestopographie (2013a). Grundwasserschutzareale und Grundwasserschutzzonen. Geoportal des Bundes. <map.geo.admin.ch> (Zugriff: 25.08.15).
- Swisstopo Bundesamt für Landestopographie (2013b). Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000. Kartenblatt Sembrancher Nr. 1325. Geoportal des Bundes. <map.geo.admin.ch> (Zugriff: 01.09.14)
- Swisstopo WMS (unbekannt): Einteilung Landeskarte 1:25'000 und Karte Swiss TLM. (Zugriff: 29.05.2015)
- White, A. F. (1995). Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. In A. F. White & S. L. Brantly (Ed.), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals* (Vol. 31, pp. 407-461). Washington, DC: Reviews in Mineralogy.
- ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (2013). CHNO Messung mit TruSpec Macro Analyser. Wädenswil: Forschungsgruppe Bodenökologie.

Anhang 1: Profilstandorte Peiloz-1 und Peiloz-2

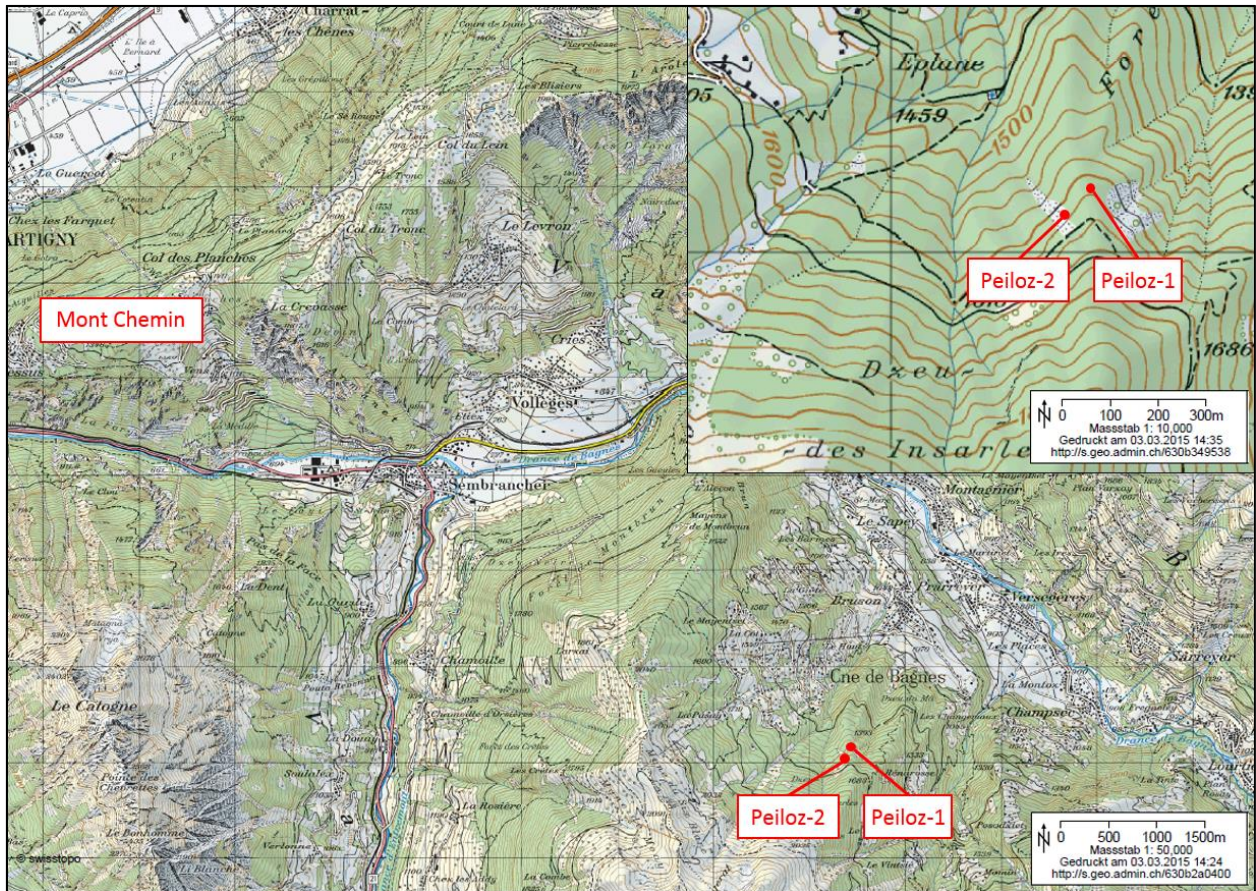


Abb. 48 Standorte der Profile 10 und 11 (Peiloz) bei Bruson im Val de Bagnes (verändert, nach Swisstopo 2007)

Anhang 2: XRF-Ergebnisse des Bodenmaterials

Tab. 10 Ergebnisse der XRF Röntgenfluoreszenzspektrometrie des Bodenmaterials

Profil Nr.	Horizonte	UZH Label	Na [g/kg]	Mg [g/kg]	Al [g/kg]	Si [g/kg]	P [g/kg]	S [g/kg]	Cl [g/kg]	K [g/kg]	Ca [g/kg]	Ti [g/kg]	V [g/kg]	Cr [g/kg]	Mn [g/kg]	Fe [g/kg]	Co [g/kg]
1	yBC	92C14AB41	15,05	39,29	67,82	217,4	1,014	1,694	0,0296	23,77	74,28	2,835	0,0671	0,0532	3,792	212,6	0,003
	yBA	92C14AB42	18,01	29,34	83,07	275,7	0,7748	1,102	0,002	22,27	42,42	4,111	0,0935	0,0743	2,805	158,3	0,003
	bB	92C14AB43	14,14	33,62	85,8	293,1	0,3819	0,427	0,002	21,35	34,52	4,245	0,0884	0,0786	1,818	126,4	0,0162
	bBC	92C14AB44	15,3	34,07	86,29	287	0,3901	0,2351	0,002	25,24	27,66	3,961	0,09	0,0759	1,926	153,4	0,003
2	yA1	92C14AB45	10,07	45,21	46,99	147,3	0,6535	0,9559	0,0653	26,79	52,44	1,522	0,0451	0,0322	3,645	116,9	0,0142
	yA2	92C14AB46	9,94	47,99	49,33	161,4	0,6548	0,9674	0,0069	27,72	68,77	1,717	0,0526	0,0351	3,733	130,8	0,0089
	yA3	92C14AB47	12,78	48,82	76,91	238,1	0,8511	0,5434	0,002	35,86	75,62	3,318	0,0791	0,0668	4,054	153,1	0,0162
	C	92C14AB48	14,99	45,86	73,2	234,8	0,6836	0,8324	0,002	32,55	73,77	3,109	0,0801	0,0586	4,22	168	0,003
	yA	92C14AB49	5,69	13,3	48,42	271,4	0,5433	0,7414	0,0856	29,74	6,437	2,263	0,0507	0,0403	1,881	29,47	0,0229
3	yB	92C14AB50	5,89	13,26	59,37	312	0,2711	0,2874	0,0432	40,45	3,469	3,307	0,0629	0,0419	1,632	30,93	0,0237
	yBC	92C14AB51	8,23	10,33	66,52	279,8	0,1812	0,1577	0,0171	49,85	2,15	4,679	0,0755	0,0677	0,8926	36,71	0,0187
	bBA	92C14AB52	8,06	15,15	78,1	291,9	0,1709	0,1784	0,0206	40,59	5,244	5,003	0,1008	0,0772	0,8468	40,08	0,026
	yA	92C14AB53	0,1	7,45	25,46	133,9	0,0458	0,002	0,002	8,684	365,1	1,03	0,0365	0,048	1,07	7,304	0,003
	yC - 30cm	92C14AB54	0,1	6,99	25,91	165,1	0,003	0,002	0,002	10,88	361,1	1,157	0,0373	0,0544	0,7142	7,841	0,003
5	yC - 50cm	92C14AB55	0,1	7,81	29,92	165,2	0,003	0,002	0,002	12,04	348,5	1,357	0,0454	0,0648	1,025	8,774	0,003
	yA	92C14AB56	12,34	27,74	70,26	214,3	0,7829	0,9404	0,1521	26,52	39,55	3,233	0,0623	0,0536	3,057	136,4	0,0282
	yAC	92C14AB57	14,99	26,58	65,58	196,4	0,7057	1,141	0,235	24,66	41,55	3,063	0,0653	0,0433	3,383	132,8	0,0282
	yAh - 8cm	92C14AB58	13,75	22,03	67,32	207,5	0,907	0,6917	0,044	22,67	11,66	3,515	0,075	0,0675	2,434	135,2	0,1382
	yAh - 16cm	92C14AB59	18,74	31,98	75,19	225,9	0,894	1,265	0,1191	21,03	23,45	3,019	0,0735	0,0617	7,936	246,2	0,361
7	yC - 15cm	92C14AB60	5,21	10,3	56,29	236	0,3174	0,277	0,042	21,62	92,63	3,349	0,0841	0,0697	0,7731	19,3	0,0167
	yC - 30cm	92C14AB61	5,05	10,28	56,69	239,4	0,2276	0,233	0,0065	21,68	102,3	3,265	0,083	0,0784	0,7883	18,56	0,0145
	yAh	92C14AB62	15,46	82,45	58,59	194,7	0,835	1,726	0,0199	14,43	6,042	1,694	0,0374	0,0263	2,031	281,8	0,0248
8	yCB	92C14AB63	10,38	31,44	81,01	262,3	0,4945	0,2478	0,002	35,91	12,57	4,818	0,1068	0,0886	1,592	60,25	0,0269
	yC	92C14AB64	8,21	32	75,13	270,8	0,4482	0,4144	0,002	44,35	17,41	4,187	0,0847	0,0547	1,422	60,4	0,0333
	yA1	92C14AB65	10,29	18,78	63,11	214,8	0,2903	0,002	0,002	31,78	118,8	3,566	0,1088	0,0634	1,717	38,87	0,0532
9	yA2	92C14AB66	11,67	19,6	70,17	251,3	0,3717	0,002	0,002	36,76	123,3	3,969	0,1221	0,0677	1,786	42,4	0,0555
	yAC	92C14AB67	12,51	21,82	91,08	206,4	0,003	1,338	0,002	35,46	87,83	3,726	0,1259	0,0934	1,611	45,96	0,0424
	yA	92C14AB68	20,1	7,49	54,03	208,7	0,775	10,2	0,002	22,02	0,9085	2,888	0,0603	0,0581	0,2617	105,7	0,003
10	1-yAB	92C14AB69	25,88	12,88	80,45	264,8	0,6465	1,064	0,002	28,41	1,258	4,418	0,1092	0,0831	1,864	62,76	0,021
	yC	92C14AB70	23,83	17,96	91,2	276	0,238	0,7701	0,0174	29,13	1,688	5,185	0,1225	0,0934	0,7408	44,85	0,0677
	2-yAB	92C14AB71	19,83	12,47	84,86	290,1	0,1784	1,385	0,002	26,54	2,22	4,47	0,0969	0,0629	1,083	39,66	0,056
	yBC	92C14AB72	24,64	15,76	84,26	276,3	0,2494	1,562	0,0316	29,25	1,42	4,781	0,1193	0,0928	1,73	52,19	0,0665
	yAh	92C14AB73	26,19	10,65	92,72	345,2	0,818	2,338	0,002	39,11	1,308	5,184	0,144	0,0953	1,969	52,43	0,1035
11	yBC-20cm	92C14AB74	26,66	10,64	93,22	346,2	0,912	2,281	0,002	39,54	1,359	5,416	0,1492	0,1011	1,887	53,67	0,0907
	yBC-30cm	92C14AB75	29,11	20,22	88,31	278,7	0,6576	0,274	0,002	30,25	3,935	5,284	0,1516	0,1075	1,786	72,79	0,0705

Profil Nr.	Horizonte	Ni [g/kg]	Cu [g/kg]	Zn [g/kg]	Ga [g/kg]	Ge [g/kg]	As [g/kg]	Se [g/kg]	Br [g/kg]	Rb [g/kg]	Sr [g/kg]	Y [g/kg]	Zr [g/kg]	Nb [g/kg]	Mo [g/kg]	Ru [g/kg]	Rh [g/kg]
1	yBC	0,0164	1,524	0,3774	0,0346	0,0017	0,0841	0,0035	0,0006	0,2764	0,2173	0,0201	0,1053	0,0078	0,0038	0,0005	0,0005
	yBA	0,0228	1,419	0,2607	0,0288	0,0015	0,0752	0,0039	0,0022	0,2349	0,1916	0,0258	0,1666	0,0126	0,0025	0,0005	0,0005
	bB	0,0337	0,3518	0,2546	0,0341	0,0047	0,0382	0,001	0,0001	0,2166	0,2734	0,0276	0,1855	0,0118	0,0026	0,0005	0,0005
	bBC	0,0307	0,4072	0,2702	0,0368	0,0028	0,0324	0,0001	0,0002	0,2558	0,2403	0,0312	0,1477	0,0108	0,0035	0,0005	0,0005
2	yA1	0,0181	0,3332	0,8102	0,019	0,0011	0,0399	0,0002	0,0024	0,3084	0,1264	0,0207	0,0554	0,0057	0,0036	0,0005	0,0005
	yA2	0,0165	0,4325	1,052	0,0198	0,0019	0,0294	0,0002	0,0012	0,3156	0,1179	0,0236	0,0588	0,0059	0,0032	0,0005	0,0005
	yA3	0,0301	0,7436	0,9305	0,0198	0,0011	0,0232	0,0002	0,0002	0,3257	0,2247	0,0316	0,1072	0,0098	0,0046	0,0005	0,0005
3	C	0,0197	1,252	1,202	0,0154	0,0003	0,0184	0,0002	0,0002	0,3005	0,304	0,0273	0,1004	0,0089	0,0058	0,0005	0,0005
	yA	0,0127	0,0663	0,0769	0,017	0,0023	0,1064	0,0004	0,0027	0,2697	0,0228	0,0613	0,1108	0,0057	0,0058	0,0005	0,0005
4	yB	0,0148	0,0874	0,0612	0,02	0,0022	0,1125	0,0002	0,0016	0,3656	0,0345	0,0599	0,1343	0,007	0,0052	0,0005	0,0005
	yBC	0,0133	0,0551	0,0588	0,0242	0,0027	0,071	0,0002	0,001	0,4765	0,0339	0,0497	0,2221	0,0108	0,0038	0,0005	0,0005
	bBA	0,0222	0,0503	0,0801	0,0245	0,002	0,0681	0,0004	0,0012	0,3801	0,0495	0,0453	0,2179	0,0116	0,004	0,0005	0,0005
5	yA	0,0005	0,1989	2,869	0,0005	0,0005	0,0004	0,0164	0,0098	0,0645	0,0486	0,1056	0,0599	0,0051	0,1617	0,0005	0,0005
	yC - 30cm	0,0005	0,2034	2,939	0,0005	0,0005	0,0356	0,0147	0,0088	0,0864	0,0645	0,0945	0,0635	0,0052	0,1037	0,0005	0,0005
	yC - 50cm	0,0005	0,2479	3,177	0,0005	0,0005	0,0262	0,0158	0,0082	0,093	0,0536	0,0985	0,0684	0,0057	0,1239	0,0005	0,0005
6	yCA	0,0294	0,0755	0,5525	0,0231	0,0005	0,0341	0,0002	0,0007	0,2235	0,1641	0,0247	0,1297	0,0096	0,0039	0,0005	0,0005
	yAC	0,0239	0,0903	0,5345	0,0203	0,0005	0,0289	0,0002	0,0014	0,2327	0,1837	0,0261	0,1324	0,0098	0,0025	0,0005	0,0005
7	yAh - 8cm	0,0264	0,0464	0,2874	0,021	0,0005	0,2332	0,0002	0,0008	0,175	0,0855	0,0269	0,1627	0,0106	0,004	0,0005	0,0005
	yAh - 16cm	0,0251	0,082	0,2776	0,0273	0,0005	0,7637	0,0002	0,0002	0,2274	0,1186	0,0251	0,116	0,0098	0,0064	0,0005	0,0005
8	yC - 15cm	0,0239	0,0625	0,4571	0,0053	0,0004	0,0051	0,0065	0,0064	0,1613	0,0547	0,0424	0,1144	0,0076	0,0276	0,0005	0,0005
	yC - 30cm	0,0222	0,0471	0,2934	0,0059	0,0011	0,0006	0,0056	0,0052	0,1625	0,0498	0,0462	0,115	0,0075	0,0134	0,0005	0,0005
9	yAh	0,0189	7,722	0,5557	0,0005	0,0005	0,1545	0,0002	0,0002	0,1622	0,0275	0,02	0,0524	0,0049	0,0167	0,0005	0,0005
	yCB	0,0541	0,6047	0,1116	0,0168	0,002	0,0671	0,0002	0,0016	0,3162	0,088	0,0537	0,1995	0,0116	0,0048	0,0005	0,0005
	yC	0,0318	0,6623	0,1081	0,0181	0,0026	0,0557	0,0002	0,0004	0,406	0,0809	0,0519	0,1741	0,01	0,0071	0,0005	0,0005
10	yA1	0,024	0,1314	3,914	0,01	0,0005	0,0089	0,0049	0,0028	0,1864	0,0914	0,0883	0,1528	0,0091	0,0403	0,0005	0,0005
	yA2	0,0248	0,1348	4,63	0,0107	0,0001	0,0001	0,0048	0,0038	0,2137	0,1127	0,0844	0,1563	0,0101	0,0291	0,0005	0,0005
	yAC	0,0384	0,1454	4,384	0,0192	0,0008	0,0429	0,0034	0,0021	0,1897	0,1054	0,0593	0,1169	0,0126	0,0119	0,0005	0,0005
11	yA	0,0005	0,1724	9,1	0,0005	0,0081	0,0343	0,0598	0,0487	0,0561	0,0409	0,0002	0,2011	0,0102	0,001	0,0075	0,0005
	1-yAB	0,0275	0,3075	14,45	0,0005	0,0018	0,0544	0,0147	0,0143	0,1066	0,0499	0,0078	0,1964	0,0133	0,0032	0,0005	0,0005
	yC	0,0357	0,0355	5,894	0,0319	0,003	0,0024	0,0013	0,0005	0,1133	0,0605	0,0307	0,2067	0,0128	0,0018	0,0005	0,0005
11	2-yAB	0,023	0,0409	6,671	0,0242	0,0027	0,0214	0,0022	0,0027	0,1213	0,0792	0,0293	0,1992	0,013	0,0026	0,0005	0,0005
	yBC	0,0438	0,0881	10,9	0,0389	0,0031	0,0543	0,0022	0,0014	0,1151	0,0522	0,0365	0,1877	0,0117	0,0025	0,0005	0,0005
11	yAh	0,0321	0,1439	25,21	0,032	0,0059	0,5754	0,0067	0,0059	0,1598	0,0613	0,0214	0,1992	0,0138	0,0099	0,0005	0,0005
	yBC-20cm	0,0327	0,1478	25,41	0,0284	0,0053	0,5837	0,0079	0,0069	0,1607	0,0627	0,0208	0,1959	0,0154	0,0104	0,0006	0,0005
	yBC-30cm	0,0578	0,128	22,86	0,0389	0,0068	0,0124	0,0028	0,003	0,1213	0,0657	0,0349	0,1817	0,0145	0,0053	0,0005	0,0005

Profil Nr.	Horizonte	Pd [g/kg]	Ag [g/kg]	Cd [g/kg]	In [g/kg]	Sn [g/kg]	Sb [g/kg]	Te [g/kg]	I [g/kg]	Cs [g/kg]	Ba [g/kg]	La [g/kg]	Ce [g/kg]	Pr [g/kg]	Nd [g/kg]	Sm [g/kg]	Er [g/kg]
1	yBC	0,001	0,0005	0,0021	0,0253	5,064	0,0005	0,0005	0,0007	0,0335	0,1954	0,0156	0,0362	0,0059	0,0161	0,0081	0
	yBA	0,0005	0,0005	0,0017	0,0183	3,256	0,0005	0,0005	0,0007	0,0214	0,2984	0,0217	0,0491	0,0055	0,022	0,001	0
	bB	0,0005	0,0005	0,0018	0,0103	1,698	0,0005	0,0005	0,0007	0,0175	0,3058	0,0214	0,0484	0,0055	0,0169	0,0081	0
	bBC	0,0003	0,0005	0,0022	0,0141	2,42	0,0005	0,0005	0,0007	0,0248	0,335	0,0205	0,0488	0,0084	0,0282	0,0015	0
2	yA1	0,0005	0,0005	0,0054	0,015	1,671	0,0005	0,0005	0,0007	0,0463	0,1798	0,0131	0,0296	0,0056	0,0068	0,0081	0
	yA2	0,0003	0,0005	0,0059	0,0217	2,192	0,0005	0,0005	0,0007	0,0499	0,1724	0,0159	0,0357	0,0057	0,0072	0,0081	0
	yA3	0,0004	0,0005	0,0057	0,0242	2,801	0,0005	0,0005	0,0007	0,0411	0,2948	0,023	0,0486	0,0057	0,0201	0,0081	0
	C	0,0004	0,0005	0,0073	0,0252	2,612	0,0005	0,0005	0,0007	0,0418	0,2892	0,0193	0,0459	0,0056	0,0105	0,0081	0
3	yA	0,0005	0,0005	0,0007	0,0005	0,0099	0,0005	0,0005	0,0007	0,0214	0,5953	0,0165	0,0395	0,005	0,0216	0,0081	0,0071
	yB	0,0005	0,0005	0,0008	0,0005	0,0095	0,0005	0,0005	0,0007	0,0277	1,167	0,024	0,0521	0,0073	0,0364	0,0081	0,0071
	yBC	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005	0,0153	0,0005	0,0005	0,0007	0,0274	1,118	0,0194	0,0482	0,0052	0,0318	0,0081	0,0071
	bBA	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0131	0,0005	0,0005	0,0007	0,0231	0,777	0,023	0,0549	0,009	0,033	0,0081	0,0071
4	yA	0,0005	0,0005	0,0088	0,0005	0,0303	0,0098	0,0005	0,0007	0,0015	0,1928	0,0083	0,0222	0,0058	0,0073	0,0401	0,0071
	yC - 30cm	0,0005	0,0005	0,0072	0,0005	0,0434	0,0094	0,0005	0,0007	0,0015	0,5469	0,0071	0,0207	0,0058	0,0138	0,0509	0,0071
	yC - 50cm	0,0005	0,0005	0,0079	0,0005	0,0561	0,01	0,0005	0,0007	0,0015	0,3116	0,0094	0,0231	0,0058	0,0111	0,0503	0,0071
	yCA	0,0005	0,0005	0,0047	0,0005	0,1087	0,0005	0,0005	0,0007	0,0104	0,2647	0,0191	0,0426	0,0074	0,023	0,0081	0
5	yAC	0,0005	0,0005	0,0042	0,0003	0,1322	0,0005	0,0005	0,0007	0,0137	0,2918	0,0208	0,0519	0,0056	0,0185	0,0081	0
	yAh - 8cm	0,0005	0,0005	0,0012	0,0005	0,1719	0,0005	0,0005	0,0007	0,0057	0,3941	0,0193	0,0462	0,0056	0,0143	0,0081	0
6	yAh - 16cm	0,0005	0,0005	0,0013	0,0005	0,1259	0,0005	0,0005	0,0007	0,0138	0,3627	0,0147	0,0335	0,0058	0,0115	0,0081	0
	yC - 15cm	0,0005	0,0005	0,003	0,0005	0,0315	0,0005	0,0005	0,0007	0,0014	0,5828	0,0238	0,0512	0,0069	0,0348	0,0081	0
7	yC - 30cm	0,0005	0,0005	0,0028	0,0005	0,0357	0,0005	0,0005	0,0007	0,0014	0,3917	0,0184	0,0456	0,0052	0,0256	0,0116	0
	yAh	0,0005	0,0005	0,0014	0,024	2,026	0,0005	0,0005	0,0007	0,0115	0,2738	0,0108	0,031	0,0064	0,0105	0,0081	0
8	yCB	0,0005	0,0005	0,0008	0,0005	0,1587	0,0005	0,0005	0,0007	0,0177	0,6995	0,0341	0,0787	0,0052	0,0455	0,0081	0,025
	yC	0,0005	0,0005	0,0012	0,0008	0,2217	0,0005	0,0005	0,0007	0,0173	1,48	0,0397	0,0785	0,0079	0,0555	0,0081	0,0093
9	yA1	0,0005	0,0005	0,0167	0,0005	0,0102	0,0023	0,0005	0,0007	0,0136	0,4865	0,0364	0,0881	0,0097	0,0433	0,0092	0,0071
	yA2	0,0005	0,0005	0,0193	0,0005	0,0131	0,0018	0,0005	0,0007	0,012	0,5347	0,0421	0,0963	0,0128	0,0553	0,0084	0,0071
	yAC	0,0005	0,0005	0,0215	0,0005	0,0072	0,005	0,0005	0,0007	0,0124	0,5428	0,0371	0,0755	0,0082	0,0427	0,0048	0,0071
10	yA	0,0005	0,384	0,0235	0,0039	0,0005	0,853	0,0005	0,0007	0,002	0,2219	0,0152	0,0437	0,0076	0,0096	0,0081	0
	1-yAB	0,0005	0,095	0,0126	0,0005	0,0061	0,1845	0,0005	0,0007	0,0015	0,4466	0,027	0,0779	0,0058	0,0302	0,0081	0
	yC	0,0005	0,0005	0,0086	0,0005	0,0036	0,0066	0,0005	0,0007	0,0014	0,4872	0,0303	0,0678	0,0065	0,0372	0,0081	0
	2-yAB	0,0005	0,0005	0,0065	0,0005	0,0043	0,0086	0,0005	0,0007	0,0014	0,3799	0,0261	0,0655	0,0077	0,0361	0,0081	0
11	yBC	0,0005	0,0076	0,0152	0,0005	0,0042	0,0382	0,0005	0,0007	0,0014	0,5182	0,0301	0,0753	0,0063	0,0405	0,0081	0
	yAh	0,0005	0,0328	0,0209	0,0005	0,0062	0,4365	0,0005	0,0007	0,0015	0,3802	0,0289	0,0717	0,0056	0,0337	0,0081	0
	yBC-20cm	0,0003	0,0436	0,0222	0,0005	0,0069	0,4737	0,0005	0,0007	0,0015	0,3714	0,0313	0,0729	0,0056	0,0269	0,0081	0
	yBC-30cm	0,0003	0,013	0,0198	0,0005	0,0054	0,0481	0,0005	0,0007	0,0014	0,5509	0,0277	0,0692	0,0054	0,0363	0,0081	0

Profil Nr.	Horizonte	Tm [g/kg]	Yb [g/kg]	Lu [g/kg]	Hf [g/kg]	Ta [g/kg]	W [g/kg]	Au [g/kg]	Hg [g/kg]	Tl [g/kg]	Pb [g/kg]	Bi [g/kg]	Th [g/kg]	U [g/kg]
1	yBC	0	0	0	0,0198	0,0016	0,0071	0,0009	0,0007	0,0007	0,1043	0,5724	0,0004	0,0004
	yBA	0	0	0	0,0186	0,0016	0,0012	0,0008	0,0007	0,0007	0,0683	0,5279	0,0004	0,0004
	bB	0	0	0	0,0022	0,0016	0,0038	0,0006	0,0007	0,0007	0,0533	0,2917	0,0004	0,0014
	bBC	0	0	0	0,002	0,0016	0,0048	0,0007	0,0007	0,0007	0,0629	0,394	0,0004	0,0068
2	yA1	0	0	0	0,0053	0,0016	0,0084	0,0008	0,0007	0,0027	0,2951	0,1291	0,0011	0,0004
	yA2	0	0	0	0,0021	0,0016	0,0046	0,0008	0,0005	0,0022	0,3304	0,1364	0,0004	0,0004
	yA3	0	0	0	0,014	0,0016	0,0065	0,0008	0,0011	0,0015	0,3516	0,1185	0,0061	0,0004
	C	0	0	0	0,003	0,0016	0,003	0,001	0,0007	0,0027	0,6702	0,1311	0,0057	0,0004
3	yA	0	0,0174	0	0,0024	0,0016	0,0112	0,0005	0,0004	0,0018	0,0365	0,0007	0,0104	0,0004
	yB	0	0,014	0	0,003	0,0016	0,0125	0,0005	0,0003	0,0026	0,0251	0,0005	0,0157	0,0004
	yBC	0	0,018	0	0,004	0,0016	0,0045	0,0004	0,0003	0,0034	0,0252	0,0004	0,0211	0,0004
	bBA	0	0,0178	0	0,0051	0,0016	0,0012	0,0004	0,0003	0,003	0,0363	0,0011	0,0172	0,0011
4	yA	0	0,0077	0	0,002	0,0339	0,0213	0,0018	0,0007	0,0469	22,72	0,0005	0,0004	0,0004
	yC - 30cm	0	0,0094	0	0,002	0,0335	0,017	0,0018	0,0007	0,0462	22,16	0,0005	0,0061	0,0004
	yC - 50cm	0	0,0105	0	0,002	0,0416	0,0216	0,0018	0,0007	0,0455	22,76	0,0005	0,0018	0,0004
5	yCA	0	0	0	0,0029	0,0016	0,0028	0,0006	0,0007	0,0007	0,0478	0,0419	0,0111	0,0004
	yAC	0	0	0	0,0065	0,0016	0,0053	0,0007	0,0007	0,0007	0,0653	0,0531	0,0114	0,0004
6	yAh - 8cm	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0007	0,0007	0,0007	0,0854	0,0484	0,0081	0,0004
	yAh - 16cm	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0012	0,0007	0,0007	0,0813	0,1894	0,0029	0,0004
7	yC - 15cm	0	0	0	0,0057	0,0087	0,011	0,0007	0,0007	0,0214	6,239	0,0098	0,0047	0,002
	yC - 30cm	0	0	0	0,0058	0,0088	0,0066	0,0015	0,0007	0,0205	5,58	0,0062	0,0043	0,0013
8	yAh	0	0	0	0,002	0,065	2,613	0,0035	0,0007	0,0007	0,353	0,225	0,0051	0,0004
	yCB	0	0,0286	0	0,0035	0,0068	0,0786	0,0005	0,0004	0,0045	0,0516	0,0175	0,0215	0,0011
	yC	0	0,0268	0	0,0007	0,0124	0,2814	0,0006	0,0012	0,0054	0,0515	0,0365	0,0207	0,0004
9	yA1	0	0,0276	0	0,003	0,0016	0,0027	0,0007	0,0034	0,0235	4,869	0,002	0,0165	0,0025
	yA2	0	0,0301	0	0,007	0,0016	0,0012	0,0007	0,0044	0,0249	5,196	0,002	0,0259	0,0032
	yAC	0	0,0326	0	0,0069	0,0016	0,0012	0,0007	0,0042	0,0183	3,81	0,0006	0,0137	0,0011
10	yA	0	0,0679	0	0,0375	0,2129	0,0012	0,0069	0,0754	0,1544	74,96	0,0005	0,0004	0,0083
	1-yAB	0	0,05	0	0,0258	0,0152	0,0012	0,0019	0,024	0,0479	18,78	0,0005	0,0131	0,0115
	yC	0	0,0297	0	0,0159	0,0016	0,0012	0,0005	0,0019	0,0123	1,38	0,0011	0,0145	0,0009
	2-yAB	0	0,0274	0	0,0154	0,0016	0,0012	0,0006	0,0025	0,0146	2,412	0,0005	0,0128	0,0018
11	yBC	0	0,0452	0	0,021	0,0016	0,0012	0,0007	0,0082	0,0154	2,607	0,0005	0,014	0,002
	yAh	0	0,004	0	0,0252	0,0053	0,0012	0,0011	0,0065	0,0205	8,461	0,0005	0,0154	0,005
	yBC-20cm	0	0,0424	0	0,0383	0,0016	0,0012	0,0012	0,0065	0,0194	9,521	0,0005	0,0155	0,0051
	yBC-30cm	0	0,004	0	0,019	0,008	0,0012	0,0011	0,016	0,0249	6,298	0,0005	0,0149	0,0005

Anhang 3: XRF-Ergebnisse des Skeletts

Tab. 11 Ergebnisse der XRF Röntgenfluoreszenzspektrometrie des Skeletts

Profil Nr.	Horizonte	UZH Label	Na [g/kg]	Mg [g/kg]	Al [g/kg]	Si [g/kg]	P [g/kg]	S [g/kg]	Cl [g/kg]	K [g/kg]	Ca [g/kg]	Ti [g/kg]	V [g/kg]	Cr [g/kg]	Mn [g/kg]	Fe [g/kg]	Co [g/kg]	Ni [g/kg]	Cu [g/kg]
1	yBC	92C14AB76	13,78	30,52	59,92	210,5	1,389	1,078	0,002	24,07	73,67	1,867	0,0524	0,031	2,847	246,4	0,0164	0,0079	1,168
	yBA	92C14AB77	12,62	27,98	62,23	231,5	1,11	0,7576	0,002	16,11	49,26	1,851	0,0585	0,0329	2,918	257,1	0,0132	0,0091	1,004
	bb	92C14AB78	16,76	34,57	75,32	245,3	0,4687	0,978	0,002	22,91	20,44	2,273	0,0596	0,0334	2,994	234,9	0,003	0,0119	0,2363
	bBC	92C14AB79	15,14	29,4	66,46	246	1,016	0,1443	0,002	14,45	14,7	2,143	0,0606	0,0413	2,725	267,6	0,011	0,0043	0,6541
2	yA1	92C14AB80	11,21	60,93	65,12	224,6	1,083	0,2121	0,002	40,28	90,62	2,437	0,0714	0,0362	3,821	143,5	0,0126	0,0225	0,1161
	yA2	92C14AB81	12,24	50,94	52,05	201,4	0,7249	1,532	0,002	29,73	87,97	1,776	0,0498	0,0306	3,203	141,5	0,003	0,0105	0,1303
	yA3	92C14AB82	13,72	29,8	79,91	308,5	0,3165	0,1343	0,002	34	54,15	3,695	0,0901	0,0646	1,944	102,7	0,0337	0,0352	0,2188
	C	92C14AB83	13,98	40,77	73,77	264,3	0,6317	0,2592	0,002	33,37	73,31	3,645	0,0828	0,0628	2,895	135,7	0,0267	0,0299	0,7413
3	yA	92C14AB84	4,44	9,18	33,01	472,1	0,0311	0,1232	0,0796	28,23	11,93	0,9343	0,0283	0,0162	0,7935	20,11	0,0251	0,0023	0,018
	yB	92C14AB85	4,72	10,03	57,29	437,5	0,2155	0,0372	0,0553	44,32	1,393	3,136	0,0477	0,0407	0,5207	25,07	0,0062	0,0123	0,0186
	yBC	92C14AB86	6,43	10,91	77,26	399	0,3366	0,0126	0,04	61,76	1,481	4,757	0,0726	0,062	0,4295	32,51	0,0199	0,0085	0,0179
	bBA	92C14AB87	7,21	11,74	67,6	324,7	0,1875	0,0275	0,0068	49,59	2,393	3,849	0,0693	0,0552	0,7648	32,36	0,0159	0,0218	0,0169
4	R	92C14AB88	3,91	7,27	34,54	457,6	0,012	0,7757	0,0523	25,72	2,081	1,56	0,0146	0,0203	1,191	30,49	0,023	0,0042	0,0295
	yA	92C14AB89	0,1	4,328	13,42	140,2	0,003	0,7483	0,0813	6,28	365,8	0,5719	0,0187	0,0267	0,1305	2,366	0,003	0,0005	0,0186
	yC - 30cm	92C14AB90	0,1	4,385	14,15	146,5	0,003	0,002	0,0616	6,39	351,8	0,6399	0,0239	0,0336	0,0848	2,712	0,003	0,0005	0,0261
	yC - 50cm	92C14AB91	0,1	3,892	11,67	143,7	0,003	1,037	0,0618	5,566	352,7	0,4997	0,0228	0,0229	0,119	2,375	0,003	0,0005	0,0258
5	Skelett	92C14AB92	0,25	4,94	31,33	292,5	0,003	0,002	0,0282	18,31	146	2,032	0,0529	0,1225	0,2577	7,613	0,003	0,00153	0,0658
	yCA	92C14AB93	17,8	23,28	64,41	231,2	0,7306	0,1178	0,5827	21,14	85,04	2,359	0,0519	0,0343	3,657	216,3	0,0445	0,0223	0,0579
	yAC	92C14AB94	13,52	21,92	56,83	198,5	0,4074	0,4671	1,233	15,93	71,77	1,589	0,0375	0,022	4,148	220,1	0,0244	0,0125	0,0223
	yC	92C14AB95	18,97	20,85	71,09	262,8	0,747	0,2452	0,8066	23,54	51,32	3,642	0,0666	0,0483	3,916	196,7	0,0242	0,0233	0,0135
6	yAh - 8cm	92C14AB96	21,27	24,99	76,54	254,5	0,6686	0,2117	0,1183	26,6	13,33	3,302	0,0625	0,0517	2,316	228,5	0,0932	0,0145	0,0186
	yAh - 16cm	92C14AB97	12,62	32,06	51,23	186,6	0,87	0,7078	0,3176	12,82	25,83	1,724	0,0446	0,0474	5,384	266,6	0,1345	0,0113	0,0206
	y(B)C	92C14AB98	10,79	31,88	25,08	199,2	1,432	0,3075	0,6247	7,245	71,14	0,5733	0,0161	0,0051	4,624	333,2	0,211	0,0005	0,0005
	yC - 15cm	92C14AB99	0,1	4,494	27,47	293,4	0,003	0,2137	0,0448	16,75	144,3	1,31	0,0456	0,0285	0,2037	6,072	0,003	0,0067	0,0041
7	yC - 30cm	92C14AB100	0,1	4,74	25,79	281	0,003	0,1225	0,0249	14,74	155,1	1,214	0,0391	0,0274	0,1623	6,896	0,0071	0,0057	0,0008
	yAh	92C14AB101	15,73	63,6	40,75	155,6	0,721	2,57	0,0245	8,578	10,05	0,8721	0,0233	0,0046	0,9552	373,1	0,015	0,0005	3,866
	yCB	92C14AB102	10,33	20,65	63,33	275,9	0,2628	0,1254	0,002	36,48	25,76	3,328	0,0618	0,0484	0,7014	54,98	0,0225	0,0287	0,1505
	yC	92C14AB103	9,56	23,24	63,32	283,1	0,2908	0,3534	0,002	40,06	32,74	3,459	0,058	0,0462	0,8161	37,6	0,017	0,0252	0,1431
8	yA1	92C14AB104	5,76	15,9	47,7	211,1	0,003	0,9204	0,0262	26,42	155,9	2,672	0,0792	0,0401	1,291	28,17	0,0211	0,0134	0,0233
	yA2	92C14AB105	5,82	16,15	53,11	224,5	0,0277	0,9349	0,0128	28,74	127	2,682	0,0814	0,041	1,234	29,04	0,0379	0,0155	0,0309
	yAC	92C14AB106	2,868	12,02	48,07	198,6	0,2068	0,521	0,0482	23,09	186,7	2,183	0,0608	0,0419	1,035	20,93	0,0089	0,0156	0,02
	yA	92C14AB107	21,2	8,79	63,81	293,4	0,3179	9,968	0,002	25,03	1,117	3,239	0,0643	0,0615	0,1866	46,45	0,003	0,018	0,0574
9	1-yAB	92C14AB108	24,19	10,95	68,97	276,7	0,4352	2,605	0,002	24,61	1,456	3,88	0,0857	0,0688	0,7046	44,54	0,0492	0,0189	0,1441
	yC	92C14AB109	22,44	14,47	76,79	301,3	0,3894	0,3048	0,0525	23,52	2,07	4,172	0,0919	0,0804	0,9969	37,5	0,048	0,0248	0,0282
	2-yAB	92C14AB110	18,36	10,21	65,17	335,2	0,247	0,2877	0,0192	22,67	1,78	3,303	0,0702	0,0575	0,6372	30,07	0,0314	0,028	0,018
	yBC	92C14AB111	24,38	14,02	79,17	299,5	0,3907	0,3108	0,0387	26,87	1,587	4,384	0,1032	0,0796	0,6689	38,85	0,0525	0,031	0,0318
10	yAh	92C14AB112	15,87	7,7	74,67	318,5	0,2886	1,926	0,0129	34,4	1,039	4,274	0,0996	0,0821	0,519	26,56	0,0452	0,014	0,0464
	yBC-20cm	92C14AB113	24,71	14,94	75,54	294,6	0,5445	0,3954	0,0464	27,07	3,644	4,857	0,1279	0,0947	0,6491	43,45	0,0618	0,0308	0,0419
	yBC-30cm	92C14AB114	25,19	16,62	76,99	296,9	0,5522	0,3691	0,0635	26,61	4,341	4,893	0,127	0,0943	0,6879	43,57	0,057	0,0296	0,0406

Profil Nr.	Horizonte	Zn [g/kg]	Ga [g/kg]	Ge [g/kg]	As [g/kg]	Se [g/kg]	Br [g/kg]	Rb [g/kg]	Sr [g/kg]	Y [g/kg]	Zr [g/kg]	Nb [g/kg]	Mo [g/kg]	Ru [g/kg]	Rh [g/kg]	Pd [g/kg]	Ag [g/kg]	Cd [g/kg]	In [g/kg]	Sn [g/kg]
1	yBC	0,4145	0,0426	0,0031	0,0374	0,0038	0,0002	0,2271	0,1051	0,0114	0,0584	0,0076	0,004	0,0005	0,0005	0,0012	0,0005	0,0003	0,0242	7,279
	yBA	0,3143	0,0406	0,0015	0,0555	0,0024	0,0002	0,1687	0,1518	0,0124	0,0532	0,0048	0,005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0151	3,471
	bb	0,3968	0,0431	0,0014	0,0011	0,0002	0,0002	0,216	0,151	0,0149	0,0675	0,0065	0,0027	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,017	2,545
	bBC	0,2757	0,0384	0,0013	0,0163	0,0002	0,0002	0,1182	0,1022	0,0114	0,0571	0,0062	0,003	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0003	0,0102	3,163
2	yA1	0,6373	0,0282	0,0047	0,0249	0,0002	0,0002	0,4143	0,2001	0,0286	0,0926	0,0067	0,0042	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005	0,0034	0,0194	1,819
	yA2	0,6597	0,0222	0,0063	0,0236	0,003	0,0002	0,2968	0,1125	0,0245	0,067	0,0067	0,0048	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0041	0,0342	2,604
	yA3	0,4229	0,026	0,0027	0,0078	0,0002	0,0002	0,2427	0,2285	0,0263	0,117	0,0102	0,0031	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0028	0,0105	1,105
	C	0,7289	0,0209	0,0025	0,0178	0,0002	0,0002	0,2967	0,2647	0,0291	0,1341	0,01	0,0059	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0047	0,019
3	yA	0,1102	0,0129	0,0026	0,0419	0,0001	0,0006	0,1937	0,0086	0,0452	0,0344	0,0019	0,0032	0,0005	0,0001	0,0005	0,0005	0,0007	0,0005	0,0059
	yB	0,0321	0,0185	0,0022	0,0414	0,0002	0,0005	0,3688	0,015	0,0384	0,1248	0,0066	0,0024	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0009	0,0005	0,012
	yBC	0,0437	0,0245	0,0025	0,027	0,0002	0,0004	0,5236	0,02	0,0467	0,1835	0,0102	0,0025	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,0008	0,0005	0,0152
	bBA	0,1034	0,0209	0,0016	0,0358	0,0002	0,0004	0,4297	0,0271	0,0338	0,1823	0,0089	0,0025	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005	0,0118
4	R	0,0254	0,0136	0,0043	0,0346	0,0002	0,0005	0,2064	0,1047	0,0956	0,0555	0,0016	0,003	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005	0,0074
	yA	1,17	0,0011	0,0005	0,0004	0,0009	0,0019	0,0521	0,0253	0,1079	0,0211	0,0016	0,0133	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0011	0,0005	0,0241
	yC - 30cm	0,3272	0,0005	0,0005	0,0004	0,0033	0,0023	0,0567	0,0296	0,0958	0,0252	0,0028	0,188	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0009	0,0005	0,0275
	yC - 50cm	0,6973	0,0005	0,0005	0,0004	0,0017	0,0017	0,0477	0,0277	0,1038	0,019	0,0024	0,0069	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0016	0,0215
5	Skelett	0,5906	0,0008	0,0013	0,0047	0,0046	0,0026	0,1593	0,0164	0,0404	0,0729	0,0045	0,186	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,002	0,0052
	yCA	0,3248	0,0224	0,0013	0,0105	0,0002	0,0002	0,1519	0,2416	0,0224	0,0834	0,0086	0,003	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0041	0,0005	0,1563
	yAC	0,3914	0,0191	0,0005	0,0004	0,0002	0,0002	0,11	0,2214	0,0181	0,066	0,006	0,0038	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,006	0,0011	0,2127
	yC	0,1396	0,0218	0,0005	0,0004	0,0002	0,0002	0,1367	0,1037	0,0357	0,1667	0,0098	0,029	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0008	0,0005	0,1343
6	yAh - 8cm	0,1906	0,0263	0,0006	0,1156	0,0002	0,0002	0,1775	0,0752	0,0249	0,1393	0,0102	0,0033	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0985
	yAh - 16cm	0,2514	0,0239	0,0007	0,2593	0,0002	0,0002	0,1548	0,1106	0,0127	0,0527	0,0052	0,0036	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0007	0,0017	0,1629
	y(B)C	0,1792	0,0148	0,0025	0,4295	0,0002	0,0002	0,0988	0,0584	0,0068	0,167	0,0037	0,0039	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0008	0,0005	0,1616
	yC - 15cm	0,0746	0,0104	0,001	0,0018	0,0002	0,0002	0,1251	0,018	0,0511	0,0425	0,0029	0,0067	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0313
7	yC - 30cm	0,0479	0,0098	0,0012	0,0019	0,0002	0,0003	0,1186	0,0268	0,0552	0,0535	0,0027	0,0055	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0265
	yAh	0,2794	0,0005	0,0005	0,0881	0,0002	0,0002	0,1077	0,0366	0,0062	0,013	0,0024	0,189	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0563	1,4
	yCB	0,0622	0,0177	0,0001	0,0213	0,0002	0,0001	0,3197	0,0902	0,033	0,1474	0,008	0,0032	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005	0,0837
	yC	0,056	0,0133	0,0003	0,0173	0,0002	0,0002	0,3685	0,1139	0,0347	0,1575	0,008	0,0026	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005	0,0644
9	yA1	1,365	0,0071	0,0005	0,0004	0,0015	0,0015	0,1629	0,0788	0,0883	0,1213	0,007	0,0072	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0118	0,0092
	yA2	1,08	0,0092	0,0005	0,0004	0,0019	0,0014	0,1818	0,0945	0,0707	0,127	0,008	0,004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0202	0,0005
	yAC	1,131	0,0089	0,0005	0,0004	0,0004	0,0011	0,1241	0,0659	0,093	0,0943	0,0073	0,0054	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0093	0,0005	0,0055
	yA	10,91	0,0015	0,0015	0,0091	0,0214	0,0155	0,0863	0,0418	0,0002	0,1544	0,0101	0,0025	0,0005	0,0005	0,0009	0,1502	0,0388	0,0005	0,0097
10	1-yAB	14,5	0,02	0,0051	0,0367	0,0077	0,0059	0,0972	0,0539	0,0092	0,1673	0,0119	0,0027	0,0003	0,0005	0,0003	0,043	0,0235	0,0005	0,0043
	yC	2,695	0,0237	0,002	0,0046	0,0006	0,0007	0,0946	0,0663	0,023	0,1664	0,0108	0,0016	0,0005	0,0005	0,0002	0,0005	0,0047	0,0005	0,0024
	2-yAB	3,09	0,0213	0,003	0,0141	0,0008	0,0008	0,0945	0,0572	0,0199	0,1474	0,0094	0,0019	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0028	0,0005	0,003
	yBC	4,527	0,0291	0,0016	0,0246	0,0008	0,001	0,1082	0,0634	0,0244	0,1788	0,0117	0,0019	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0049	0,0005	0,004
11	yAh	7,613	0,0252	0,0034	0,1797	0,0032	0,0031	0,1379	0,0348	0,0164	0,1768	0,0117	0,0041	0,0005	0,0005	0,0005	0,0377	0,0077	0,0005	0,0042
	yBC-20cm	9,168	0,0352	0,0034	0,009	0,0012	0,0005	0,1117	0,0644	0,0298	0,1857	0,0132	0,0023	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0073	0,0005	0,0034
	yBC-30cm	9,851	0,0371	0,0037	0,0071	0,0009	0,0004	0,107	0,0703	0,029	0,1574	0,0124	0,0024	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0058	0,0005	0,0028

Profil Nr.	Horizonte	Sb	Te	I	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Au	Hg
		[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
1	yBC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0206	0,2463	0,0125	0,0275	0,0062	0,0072	0,0081	0	0	0	0,0111	0,0016	0,0363	0,0011	0,0007	
	yBA	0,0005	0,0005	0,0007	0,0128	0,1666	0,0107	0,028	0,0061	0,0076	0,0081	0	0	0	0,0122	0,0016	0,0012	0,0011	0,0007	
	bB	0,0005	0,0005	0,0007	0,0148	0,2452	0,0227	0,0516	0,0062	0,0089	0,0081	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0011	0,0007	
	bBC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0088	0,2005	0,0057	0,02	0,0062	0,0079	0,0081	0	0	0	0,0037	0,0016	0,0012	0,0012	0,0007	
2	yA1	0,0005	0,0005	0,0007	0,0513	0,1811	0,0281	0,068	0,0057	0,0148	0,0081	0	0	0	0,0022	0,0016	0,0016	0,0007	0,0007	
	yA2	0,0005	0,0005	0,0007	0,038	0,1756	0,0155	0,0331	0,0058	0,0073	0,0007	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0009	0,0007	
	yA3	0,0005	0,0005	0,0007	0,0192	0,3647	0,0228	0,0503	0,0054	0,0238	0,0081	0	0	0	0,01	0,0016	0,0016	0,0006	0,0007	
	C	0,0005	0,0005	0,0007	0,0337	0,2829	0,0178	0,0427	0,0056	0,0168	0,0017	0	0	0	0,0205	0,0016	0,0078	0,0007	0,0007	
3	yA	0,0007	0,0032	0,0007	0,0204	0,2434	0,0124	0,0222	0,0218	0,0225	0,0081	0,0071	0	0,0098	0	0,0015	0,0016	0,007	0,0003	0,0007
	yB	0,0005	0,0005	0,0007	0,0257	0,4463	0,0161	0,0289	0,0223	0,0266	0,0081	0	0	0	0,0061	0,0016	0,0105	0,0003	0,0007	
	yBC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0266	0,5683	0,0181	0,0372	0,0118	0,0253	0,0081	0,0071	0	0,0135	0	0,0048	0,0016	0,0019	0,0003	0,0007
	bBA	0,0005	0,0005	0,0007	0,0243	0,5697	0,018	0,0453	0,0067	0,031	0,0081	0	0	0	0,006	0,0016	0,0049	0,0004	0,0007	
4	R	0,0005	0,0067	0,0568	0,0086	2,449	0,0136	0,016	0,0049	0,0179	0,0081	0,0071	0	0,0153	0	0,0008	0,0016	0,0146	0,0003	0,0007
	yA	0,0005	0,0005	0,0007	0,0014	0,0642	0,0046	0,012	0,0054	0,0068	0,0407	0,0071	0	0,0115	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0008	0,0007
	yC - 30cm	0,0008	0,0005	0,0007	0,0013	0,0579	0,0032	0,0033	0,0055	0,0069	0,0343	0,0071	0	0,004	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0008	0,0007
	yC - 50cm	0,0008	0,0005	0,0007	0,0014	0,0541	0,0058	0,0167	0,0054	0,0068	0,0387	0,0071	0	0,0122	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0007	0,0007
5	Skelett	0,0005	0,0005	0,0007	0,0016	0,1246	0,0098	0,0192	0,0052	0,0087	0,013	0	0	0	0,0023	0,0029	0,0089	0,0014	0,0007	
	yCA	0,0005	0,0005	0,0007	0,0053	0,2338	0,016	0,0357	0,0058	0,0074	0,0008	0	0	0	0,0122	0,0016	0,0048	0,0008	0,0012	
	yAC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0052	0,1731	0,0126	0,0276	0,006	0,0123	0,0081	0	0	0	0,0052	0,0016	0,0012	0,0009	0,0007	
	yC	0,0005	0,0005	0,0007	0,003	0,3643	0,0198	0,0459	0,0057	0,0186	0,0081	0	0	0	0,0092	0,0016	0,0012	0,0007	0,0007	
6	yAh - 8cm	0,0005	0,0005	0,0007	0,0031	0,3182	0,0172	0,039	0,0059	0,0254	0,0081	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0009	0,0007	
	yAh - 16cm	0,0005	0,0005	0,0007	0,0124	0,1936	0,0089	0,0211	0,0061	0,0077	0,0081	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0012	0,0007	
	y(B)C	0,0005	0,0005	0,0007	0,0079	0,0683	0,0052	0,0065	0,0062	0,008	0,0081	0	0	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0013	0,0007	
	yC - 15cm	0,0005	0,0005	0,0007	0,0013	0,1897	0,017	0,0473	0,005	0,0172	0,0153	0,0071	0	0,004	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0004	0,0007
8	yC - 30cm	0,0005	0,0005	0,0007	0,0013	0,1728	0,0084	0,0246	0,0051	0,0109	0,0136	0,0071	0	0,004	0	0,002	0,0016	0,0012	0,0004	0,0007
	yAh	0,0005	0,0005	0,0007	0,0054	0,0806	0,0063	0,0115	0,0069	0,0089	0,0081	0	0	0	0,0249	0,127	5,335	0,0064	0,0007	
	yCB	0,0005	0,0005	0,0007	0,0125	0,5132	0,0195	0,0495	0,0086	0,0247	0,0081	0	0	0	0,0065	0,0016	0,0049	0,0004	0,0007	
	yC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0129	0,8957	0,0236	0,0487	0,0052	0,0364	0,0081	0	0	0	0,006	0,0016	0,0061	0,0004	0,0007	
9	yA1	0,0005	0,0005	0,0007	0,0095	0,4469	0,0297	0,0653	0,0053	0,031	0,013	0,0071	0	0,015	0	0,0039	0,0016	0,0079	0,001	0,0003
	yA2	0,0005	0,0005	0,0007	0,0095	0,4569	0,0234	0,0531	0,006	0,0267	0,0084	0,0071	0	0,016	0	0,0039	0,0016	0,0004	0,0005	0,0013
	yAC	0,0005	0,0005	0,0007	0,0024	0,3771	0,023	0,0529	0,0074	0,0313	0,0178	0,0071	0	0,0189	0	0,0025	0,0016	0,0128	0,0009	0,0007
	yA	0,2723	0,0005	0,0007	0,0016	0,3239	0,0135	0,0386	0,006	0,0205	0,0081	0	0	0,0144	0	0,0033	0,0373	0,0012	0,0025	0,0166
10	1-yAB	0,0768	0,0005	0,0007	0,0014	0,4241	0,0188	0,0511	0,0061	0,0283	0,0081	0	0	0,0391	0	0,0245	0,0097	0,0012	0,0011	0,0075
	yC	0,0025	0,0005	0,0007	0,0013	0,3858	0,0187	0,0426	0,0051	0,0196	0,0081	0	0	0,0241	0	0,0102	0,0016	0,0012	0,0004	0,0011
	2-yAB	0,0008	0,0005	0,0007	0,0013	0,3457	0,0163	0,0392	0,005	0,0115	0,0081	0	0	0	0,01	0,0016	0,0012	0,0004	0,0012	
	yBC	0,0102	0,0005	0,0007	0,0013	0,499	0,0224	0,0543	0,0077	0,0318	0,0081	0	0	0,0275	0	0,013	0,0016	0,0012	0,0004	0,0028
11	yAh	0,1398	0,0005	0,0007	0,0014	0,3371	0,0191	0,0458	0,0055	0,0274	0,0081	0	0	0,0193	0	0,0159	0,0016	0,0012	0,0005	0,0048
	yBC-20cm	0,0058	0,0005	0,0007	0,0013	0,5924	0,0248	0,0584	0,0063	0,0406	0,0081	0	0	0,0357	0	0,0213	0,0016	0,0012	0,0005	0,0033
	yBC-30cm	0,0037	0,0005	0,0007	0,0013	0,54	0,0268	0,0605	0,0083	0,0332	0,0081	0	0	0,0361	0	0,018	0,0016	0,0012	0,0005	0,0041

Profil Nr.	Horizonte	Tl [g/kg]	Pb [g/kg]	Bi [g/kg]	Th [g/kg]	U [g/kg]
1	yBC	0,0013	0,1202	0,6888	0,0004	0,0004
	yBA	0,0007	0,0842	0,5415	0,0004	0,0021
	bb	0,0007	0,1147	0,3663	0,0004	0,0004
	bBC	0,0007	0,094	0,6232	0,0004	0,0004
2	yA1	0,0019	0,2337	0,0657	0,0093	0,0026
	yA2	0,001	0,2939	0,5788	0,0004	0,0004
	yA3	0,0015	0,1393	0,0423	0,0142	0,0023
	C	0,0022	0,2322	0,0718	0,0118	0,003
3	yA	0,0017	0,041	0,001	0,0051	0,0004
	yB	0,0031	0,012	0,0043	0,012	0,0004
	yBC	0,0045	0,0175	0,002	0,0182	0,0004
	bBA	0,0042	0,0522	0,0005	0,013	0,0004
	R	0,0016	0,0383	0,0005	0,0078	0,0004
	yA	0,0187	2,836	0,0005	0,0039	0,0004
4	yC - 30cm	0,0189	4,939	0,0005	0,0025	0,0004
	yC - 50cm	0,0158	3,202	0,0005	0,001	0,0004
	Skelett	0,0188	4,829	0,0036	0,0062	0,0004
	yCA	0,0012	0,0458	0,0473	0,0136	0,0004
5	yAC	0,0007	0,0475	0,2551	0,0022	0,0012
	yC	0,0007	0,0371	0,0005	0,0246	0,0027
	yAh - 8cm	0,0007	0,0554	0,0321	0,0149	0,0004
6	yAh - 16cm	0,0007	0,0592	0,1488	0,0034	0,0004
	y(B)C	0,0007	0,0618	0,1998	0,0043	0,0004
	yC - 15cm	0,0023	0,2521	0,0009	0,0031	0,0004
7	yC - 30cm	0,0017	0,1666	0,0005	0,0037	0,0004
	yAh	0,0007	0,1022	0,109	0,0137	0,0004
	yCB	0,0038	0,0186	0,0049	0,0132	0,0004
8	yC	0,0047	0,0183	0,0071	0,0152	0,0004
	yA1	0,0194	2,252	0,0005	0,0136	0,0004
	yA2	0,0177	2,48	0,0005	0,0135	0,0004
9	yAC	0,0153	1,55	0,0005	0,0114	0,0004
	yA	0,0709	26,46	0,0005	0,0004	0,0027
	1-yAB	0,0274	8,687	0,0005	0,0089	0,0034
10	yC	0,0047	0,5681	0,0005	0,0113	0,0003
	2-yAB	0,0056	0,629	0,0005	0,0094	0,0007
	yBC	0,0058	0,7339	0,0005	0,0124	0,001
11	yAh	0,0119	2,711	0,0005	0,0104	0,0026
	yBC-20cm	0,0085	1,118	0,0005	0,0123	0,0012
	yBC-30cm	0,0071	1,039	0,0005	0,0135	0,0006

Anhang 4: XRD-Resultate

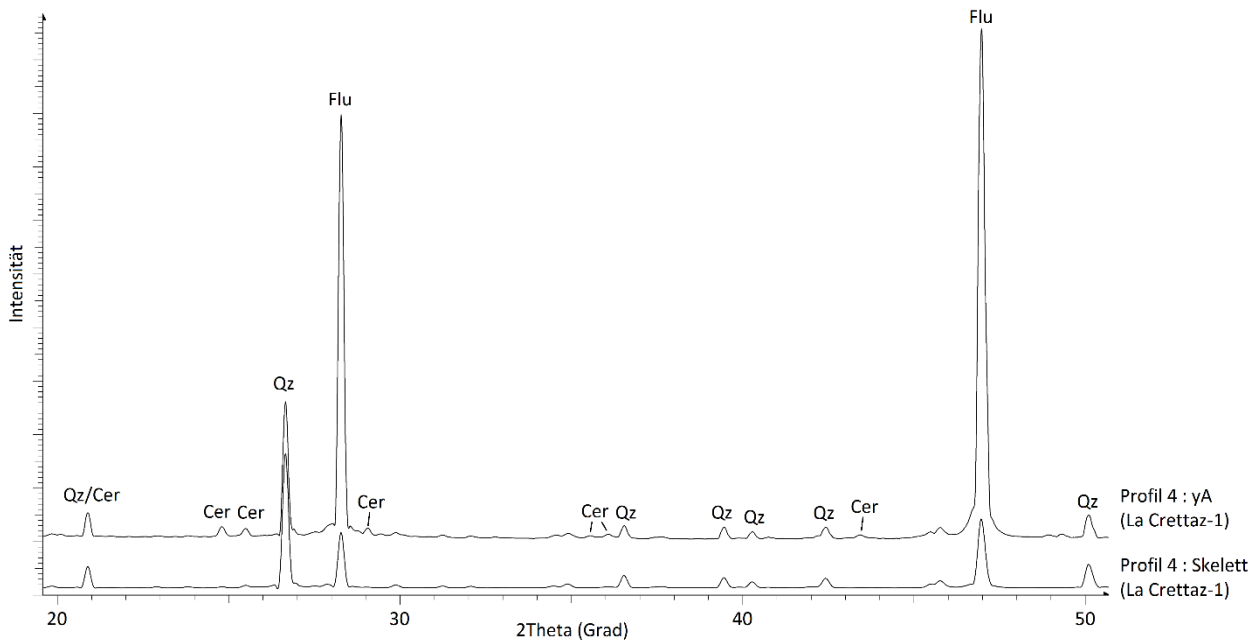


Abb. 49 XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden yA mit dem Skelett von Profil 4 La Crettaz-1 (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Cer = Cerussit)

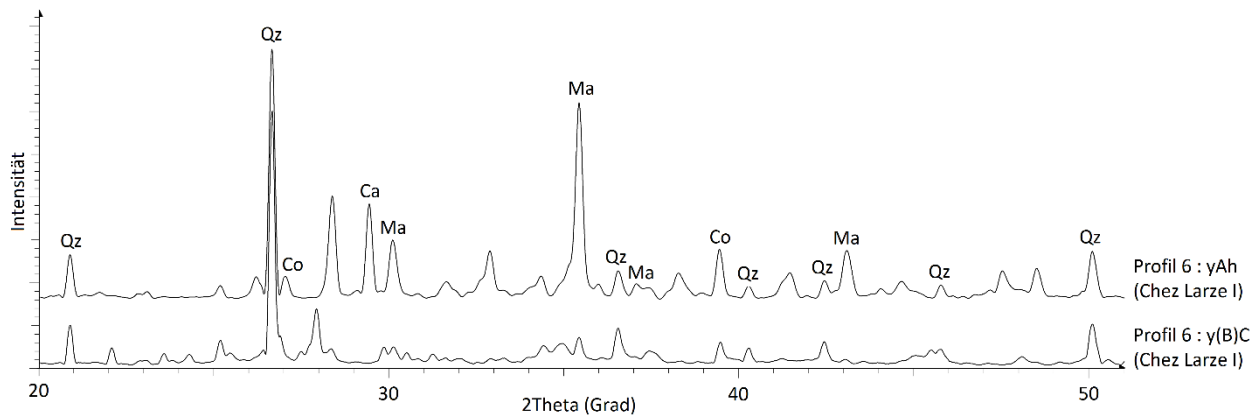


Abb. 50 XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden yAh mit dem Ausgangsgestein y(B)C von Profil 6 Chez Larze I (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Co = Cobaltit, Ca = Calcit, Ma = Magnetit)

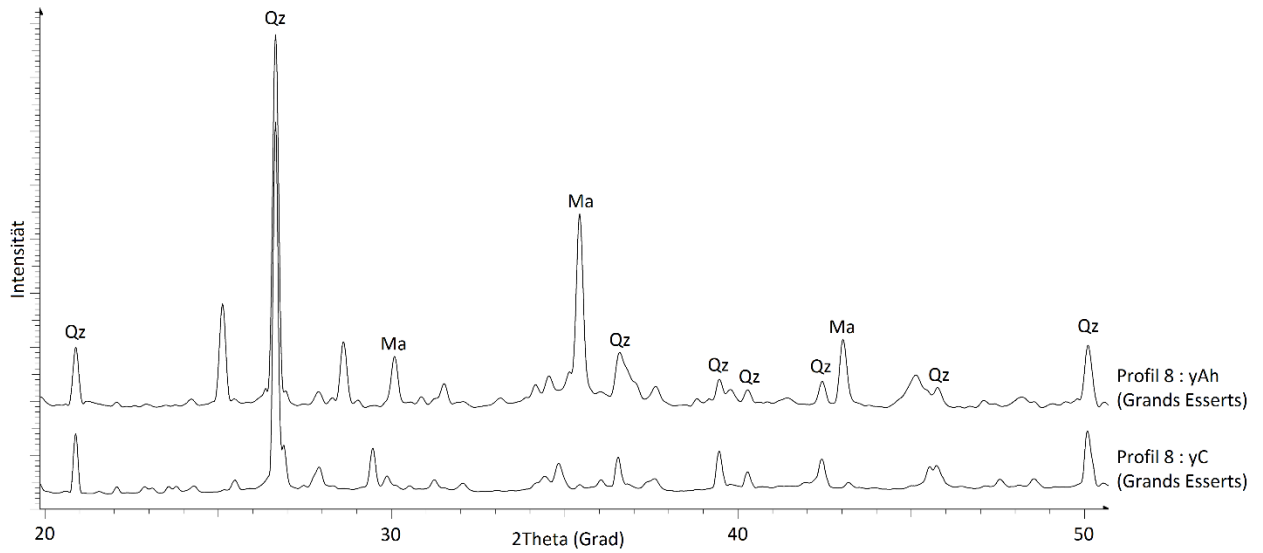


Abb. 51 XRD-Diffraktogramm: Vergleich vom Oberboden yAh mit dem Ausgangsgestein yC von Profil 8 Grands Esserts (Glättungsfaktor = 0.142, Qz = Quarz, Ma = Magnetit)

Anhang 5: Element-Ratio Ti, Zr und V

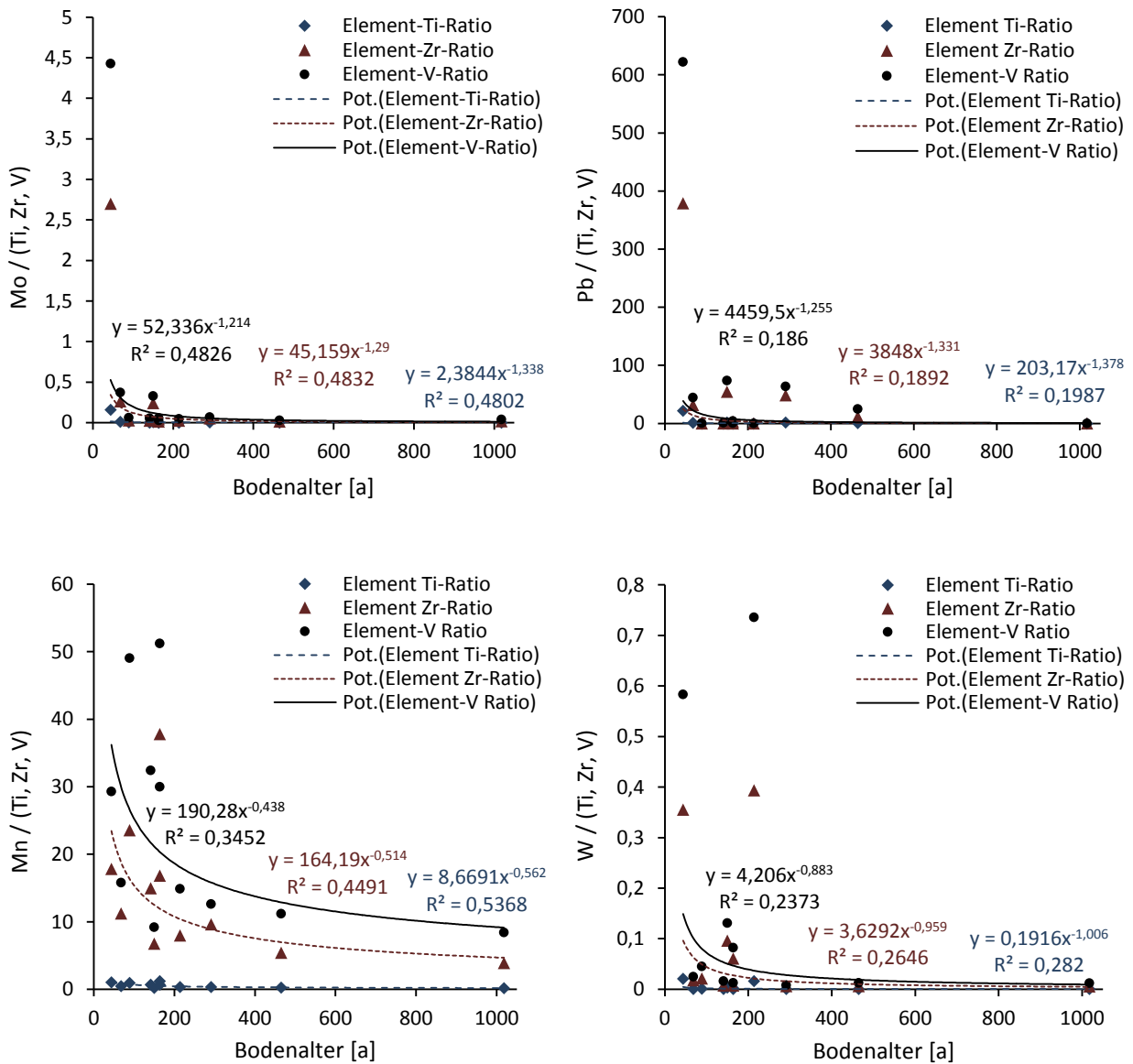


Abb. 52 Molybdän Mo, Blei Pb, Mangan Mn und Wolfram W relativ zu den immobilen Elementen Ti, Zr, und V als Funktion der Zeit. Der Trend ist dargestellt als Potenzfunktion.

Anhang 6: Grundwasserschutz

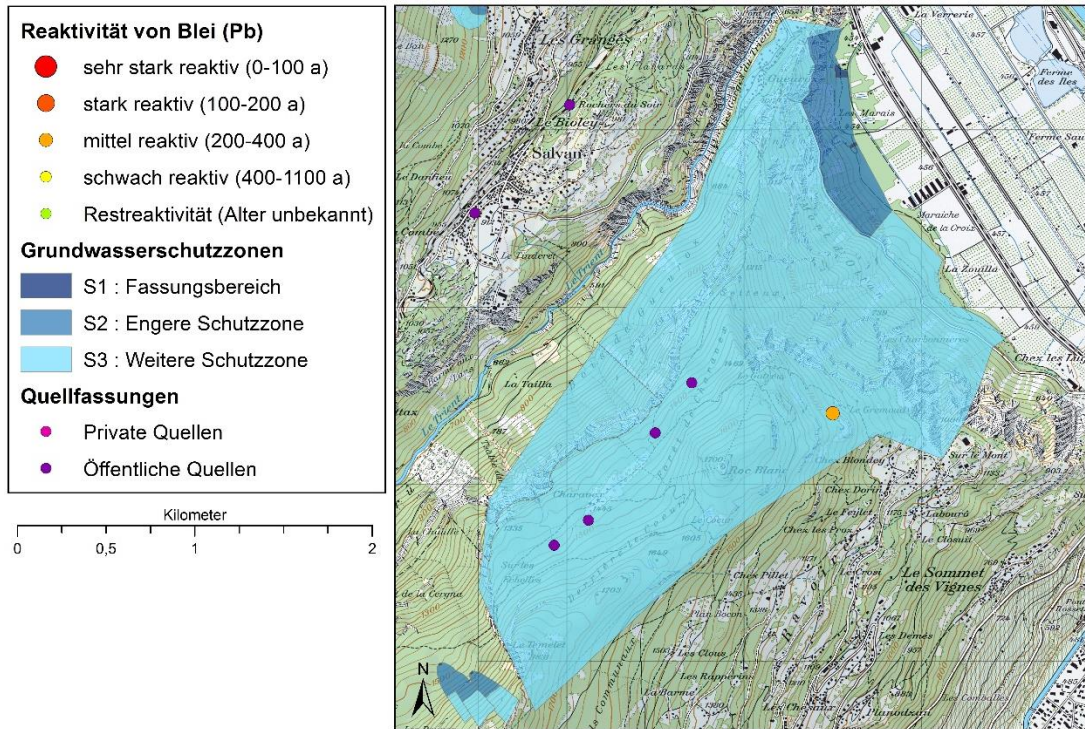


Abb. 53 Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Ravoire" (569'500/106'400) bei Martigny-Combe (VS) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)

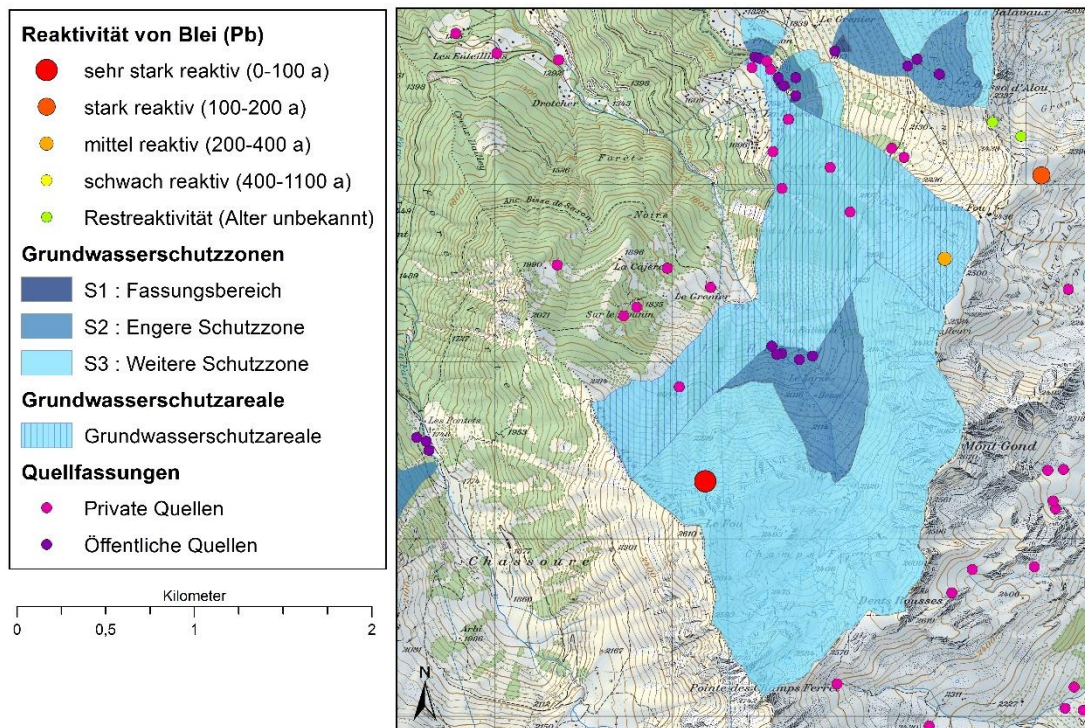


Abb. 54 Reaktivität von Blei bei den Minenstandorten „Le Fou“ (587'190/108'325) und „Siviez, Grand Creux“ (588'540/109'580) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)

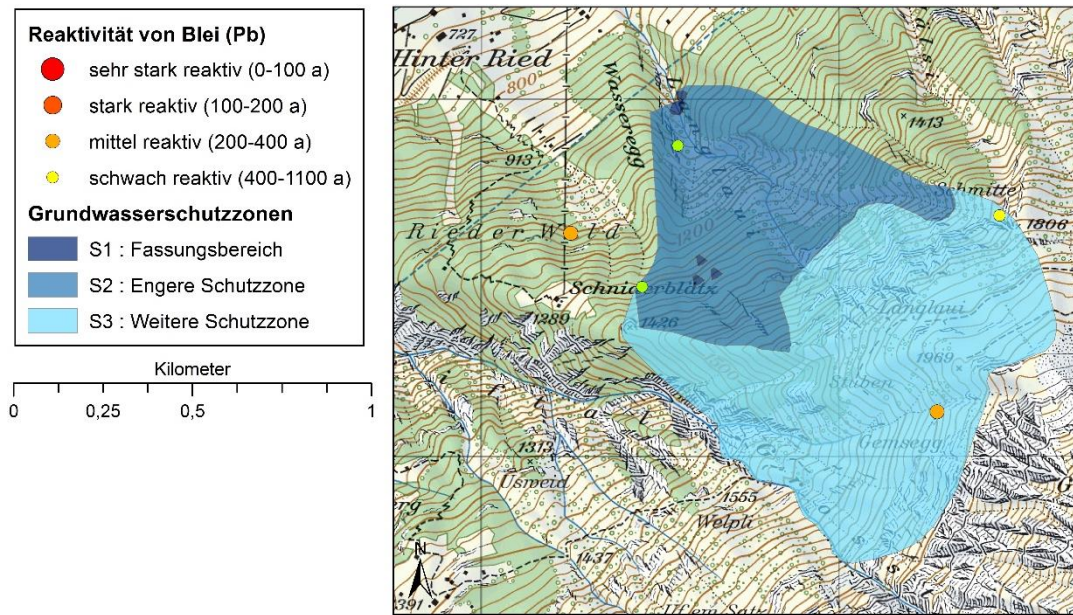


Abb. 55 Reaktivität von Blei beim Minenstandort "Stuben" (694'275/178'125) in der Nähe von Gurtellen (UR) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)

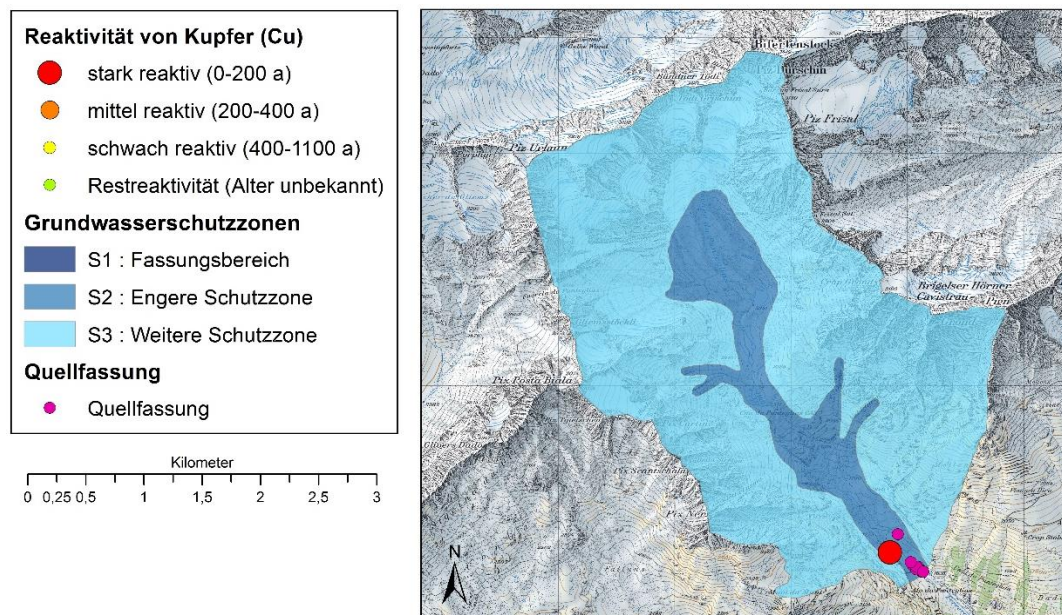


Abb. 56 Reaktivität von Kupfer beim Minenstandort "Puntaiglas" (716'850/180'565) im Val Punteglias (GR) in Bezug auf Grundwasserschutzzonen (bearbeitet, nach Swisstopo WMS)

Persönliche Erklärung

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

Köniz, September 2015

Annelies Berger