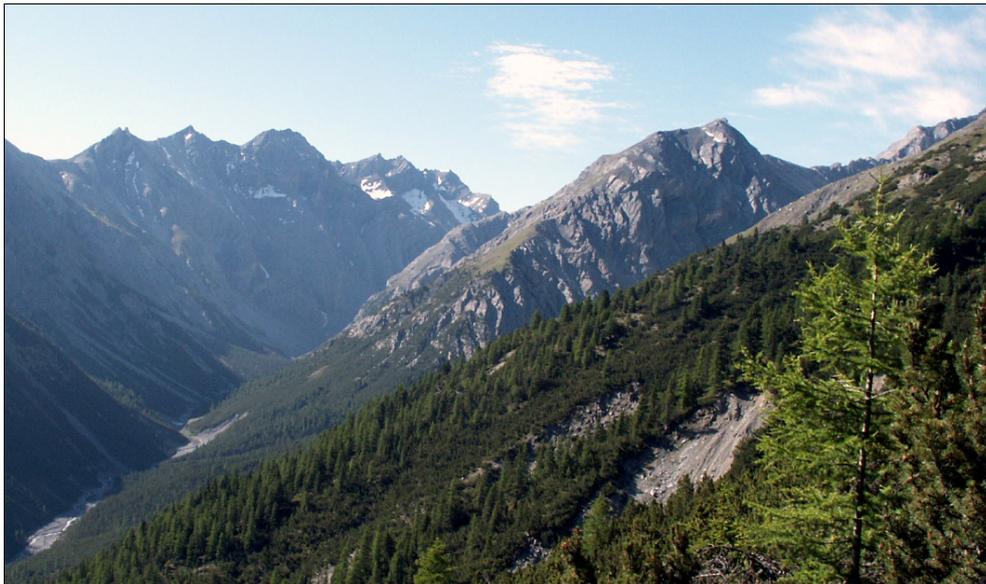


Diplomarbeit

Geographisches Institut der Universität Zürich
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Modellierung von Bodeneigenschaften mittels Fuzzy-Logik im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks



eingereicht im: Juni 2006

von: Christian Kägi aus Hünenberg (ZG)

betreut durch: Dr. Peter Lüscher (WSL)
Dr. Markus Egli
Dr. Britta Allgöwer
Dr. Stephan Imfeld

Fakultätsvertreter: Prof. Dr. Michael Schmidt

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die in irgendeiner Art zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben:

Der grösste Dank gebührt meinen beiden Hauptbetreuern Dr. Markus Egli vom Geographischen Institut und Dr. Peter Lüscher von der WSL. Peter Lüscher stand mir vor allem im bodenkundlichen Bereich und bei den Feld- und Laborarbeiten zur Seite, während Markus Egli mich sowohl im bodenkundlichen Bereich als auch bei der Entwicklung des Modells unterstützte. Sie beide haben mich in kritischen Zeiten immer wieder motivieren können und mich jeder Zeit unterstützt.

Mein Dank gilt weiterhin Dr. Britta Allgöwer und Dr. Stephan Imfeld für ihre Mitbetreuung. Sie waren die Ansprechpartner von Seiten des Nationalparks und unterstützten mich im GIS-Bereich.

Während den Feldarbeiten im Nationalpark und den Laboranalysen an der WSL konnte ich auf die Unterstützung von Mitarbeitern der WSL zählen. Von Stéphane Sciacca und Roger Köchli konnte ich während dieser Zeit vieles über die Bodenansprache im Feld lernen. Marco Walser und Roger Köchli standen mir zudem bei den Laborarbeiten zur Seite.

Meinen Studienkollegen und Freunden Michael Margreth und Michael Wernli, welche mich teilweise mit bodenkundlichen als auch im GIS-Bereich mit wertvollen Tipps unterstützen konnten.

Weiter möchte ich Martin Hägeli und Stephan Zimmermann von der WSL, Martin Hölzle von Geographischen Institut, Thomas Kulbe von der EAWAG, Mario Negri und Ruedi Haller vom Nationalpark sowie dem Amt für Umwelt und Natur Graubünden für weitere unterstützende Dienste danken.

Von ganzem Herzen möchte ich mich schliesslich bei meinen Eltern Werner und Annemarie Kägi bedanken, dass sie mir dieses Studium ermöglicht haben und mich in jeder Beziehung während meines Studiums und der Entstehung der Diplomarbeit unterstützt haben.

Zürich, im Mai 2006

Christian Kägi

Zusammenfassung

Im Schweizerischen Alpenraum existieren praktisch keine detaillierten Bodenkarten. Die einzig vorhandene Grundlage bildet die Bodeneignungskarte der Schweiz, die jedoch mit einem Massstab von 1:200'000 stark generalisiert ist. Auch vom Schweizerischen Nationalpark existiert bis heute keine Bodenkarte, und dies obwohl er zu den wissenschaftlich am besten untersuchten Gebieten der Schweiz gehört. Dies liegt daran, dass die Kartierung von Böden im alpinen Raum sehr aufwändig und somit mit hohen Kosten verbunden ist. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der bodenkundlichen Kartengrundlagen im Alpenraum besteht in der Modellierung von Böden und deren Eigenschaften auf Basis von allgemein ableitbaren Gesetzmässigkeiten.

Die folgende Arbeit befasst sich mit der Beschreibung und der Modellierung von Bodeneigenschaften im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks. Primäres Ziel ist die Entwicklung eines Modells zur Generierung einer hypothetischen Bodenkarte. Eine wichtige Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von digitalen thematischen Karten. Über das Untersuchungsgebiet gibt es eine geologische und geomorphologische Karte, eine Vegetationskartierung sowie ein Digitales Höhenmodell, welche zusammen im GIS des Nationalparks (GISSNP) verwaltet werden.

In einer ersten Phase wurden zwei Feldarbeitsperioden durchgeführt, mit dem Ziel die bodenkundliche Datenbasis zu erweitern und gleichzeitig die vorhandenen GIS-Datensätze auf ihre räumliche Genauigkeit hin zu überprüfen. Es wurden im Gesamten 63 Bodenprofile aufgenommen, welche zusammen mit den 26 schon existierenden Profilen aus Beständen der WSL als bodenkundliche Basis für die Modellentwicklung dienten. Für eine Verifizierung einiger im Feld geschätzter Bodeneigenschaften wurden im Labor der pH-Wert sowie die Körnung und das C/N Verhältnis von ausgewählten Horizonten bestimmt.

In einer zweiten Phase ging es um die Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Bodentypen und anderen ausgewählten Bodeneigenschaften. Ein erster Schritt bestand darin, allgemein bekannte theoretische Annahmen über die Bodenentwicklung in Abhängigkeit von Standortfaktoren zu bestätigen, was jedoch nur teilweise zufriedenstellend gelang. Einzig die Höhenzonalität von Bodentypen konnte als deutlicher Trend anhand der Bodenprofile aufgezeigt werden. Bei der Hangkrümmung und der Neigung konnte keine signifikante Korrelation bestätigt werden, was jedoch damit zu tun hatte, dass aufgrund der beschränkten Anzahl Profile keine multivariate Analyse möglich war.

Die Nomenklatur der Böden basiert auf genetischen und morphologischen Merkmalen, was eine Modellbildung nach physikalischen Gesetzmässigkeiten verunmöglichte. Es wurde demnach ein erkenntnistheoretischer Ansatz gewählt, bei dem die Verarbeitung von qualitativen bodenkundlichen Erkenntnissen im Vordergrund stand. Die Verwendung von Fuzzy-Logik bei der Berechnung der Bodentypen brachte im Wesentlichen zwei grosse Vorteile. Einerseits konnte der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Böden ein kontinuierliches Naturphänomen darstellen, andererseits war es mit Fuzzy-Logik möglich, die teilweise nur unscharf definierten Gesetzmässigkeiten über die Bodenbildung realistischer verarbeiten zu können.

Das Modell berechnete eine hypothetische Bodenkarte, bei der 14 verschiedene Bodentypen ausgeschieden wurden. Durch ein iteratives Verfahren konnte eine gewisse Verbesserung der Resultate erreicht werden. Dazu wurde die Resultatkarte mit den 89 Profilstandorten verglichen, was schlussendlich zu einer Übereinstimmung von 58 % führte. Diese vergleichsweise bescheidene Übereinstimmung ist zu einem grossen Teil auf die Qualität der verwendeten

GIS-Datensätze zurückzuführen. Die inhaltliche und räumliche Auflösung und Qualität der zur Verfügung stehenden Ausgangsdaten war zum Teil ungenügend und stellte somit einen grossen Unsicherheitsfaktor dar.

In einer dritten Phase ging es darum, weitere Bodeneigenschaften herzuleiten. Dazu wurden aus den entsprechenden Bodenprofilaten Zuordnungsfunktionen abgeleitet, mit denen sich der gemittelte pH der Oberbodens sowie die gemittelte Bodenmächtigkeit berechnen liessen.

Eine Gesamtbeurteilung der Resultatkarten kann nur unter der Tatsache erfolgen, dass selbst im Feld kartierte Bodenkarten immer eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse darstellen. Vor diesem Hintergrund kann die Modellierung der Bodeneigenschaften als gelungen bezeichnet werden. Im Vergleich mit der Realität weist sie jedoch noch grosse Unsicherheiten auf, welche mit besseren Datengrundlagen sicherlich verringert werden könnten.

Die Resultate dieser Arbeit können als erste Schritte auf dem Wege zu einer detaillierten Bodenkarte des Nationalparks angesehen werden. Diese Arbeit kann und soll somit als Basis für künftige bodenkundliche Fragestellungen im Nationalpark verwendet werden.

Inhalt

Danksagung	I
Zusammenfassung	II
Inhalt	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Kontext dieser Diplomarbeit	1
1.2 Fragestellungen und Zielsetzung	2
1.3 Die Lage des Untersuchungsgebietes	3
2 Grundlagen	1
2.1 Bodenbildende Faktoren	1
2.1.1 Klima und Wasserhaushalt	1
2.1.2 Geologie	3
2.1.3 Vegetation und Fauna.....	5
2.1.4 Geomorphologie	7
2.1.5 Topographie.....	8
2.1.6 Mensch	8
2.2 Klassifikationsysteme	9
2.2.1 Einführung.....	9
2.2.2 Die Bodensystematik nach BGS und FAP	10
2.3 Bodenentwicklungsreihen und Definition der Bodentypen	11
2.3.1 Die Bodenentwicklung auf karbonatischem Ausgangsgestein	11
2.3.2 Die Bodenentwicklung auf silikatischem Ausgangsgestein	13
2.3.3 Die Bodenentwicklung auf gemischtem Ausgangsgestein	15
2.3.4 Die Bodenentwicklung von wassergeprägten Böden	17
2.4 Relevante Bodenbildungsprozesse	18
2.5 Die Fuzzy-Set Theorie	20
2.5.1 Unscharfe Mathematik	20
2.5.2 Unscharfe Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen	20
2.5.3 Mengenalgebraische Operationen zur Verknüpfung von unscharfen Mengen.....	21
2.5.4 Abgrenzung zur Wahrscheinlichkeitstheorie.....	22
3 Methoden und Daten	23
3.1 Bodenkundliche Datenerhebung	23
3.1.1 Feldarbeit.....	23
3.1.2 Laboranalysen.....	26
3.1.3 Klassierung der Bodentypen nach Entwicklungsstufen.....	27
3.2 Herkunft und Aufbereitung der Modellinputdaten	28
3.2.1 Geologisches Substrat.....	28
3.2.2 Die primäre Bodenbedeckung	31

3.2.3	Das digitale Höhenmodell (DHM)	33
3.2.4	Die Bodeneignungskarte.....	35
3.3	Modellierung.....	37
3.3.1	Einführung.....	37
3.3.2	Modellstruktur und Datenfluss	38
3.3.3	Bodenkundliche Modellgrundlagen.....	39
3.3.4	Modul der Terrestrischen Böden	44
3.3.5	Modul der Auengesteinsböden	56
3.3.6	Modul Nassböden.....	57
3.3.7	Validierungsprozess	59
3.3.8	Ableitung weiterer Bodeneigenschaften.....	60
4	Ergebnisse und Diskussion.....	65
4.1	Beispiele wichtiger Bodentypen im Gebiet des Nationalparks	65
4.1.1	Profil N49: Karbonatgesteinsboden.....	65
4.1.2	Profil N28: Humoser Auen-Karbonatgesteinsboden	67
4.1.3	Profil N33: Humus-Karbonatgesteinsboden.....	69
4.1.4	Profil N02: modrighumose Rendzina	70
4.1.5	Profil N42: Mischgesteinsboden.....	72
4.1.6	Profil N08: Verbraunter Regosol.....	75
4.1.7	Profil N48: Humus-Silikatgesteinslithosol.....	76
4.1.8	Profil N37: Ranker	79
4.1.9	Profil N05: Eisen-Podsol.....	80
4.1.10	Profil N26: Saure Braunerde	83
4.1.11	Profil E07: flachtorfiges Halbmoor	84
4.1.12	Profil N43: antorfiger Fahlgley	86
4.2	Die Bodentyp-Zugehörigkeitskarten	89
4.3	Die Hypothetische Bodentypenkarte	91
4.3.1	Validierung anhand der Bodenprofile.....	95
4.3.2	Vergleich mit der Bodeneignungskarte	96
4.4	Modellierung anderer Bodeneigenschaften	101
4.4.1	Der gemittelte Oberboden-pH	101
4.4.2	Die gemittelte Bodenmächtigkeit	104
4.5	Allgemeine Diskussionspunkte zur Modellierung	105
4.5.1	Bodenkundliches Grundlagewissen im Untersuchungsgebiet	105
4.5.2	Vor- und Nachteile des Fuzzy-basierten Modellansatzes	106
4.5.3	Qualität und Verfügbarkeit der Datengrundlagen.....	107
4.5.4	Massstab.....	110
4.5.5	Übertragbarkeit auf andere Gebiete.....	111
5	Schlussfolgerungen.....	112
6	Literaturverzeichnis	115
Anhang	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über das Untersuchungsgebiet (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).....	3
Abbildung 2: Vereinfachte geologisch-tektonische Karte (Aus Terra Grischuna, 1976 / 3)	5
Abbildung 3: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf karbonatischem Ausgangsgestein	12
Abbildung 4: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf silikatischem Ausgangsgestein.....	14
Abbildung 5: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf gemischt silikatisch-karbonatischem Ausgangsgestein	16
Abbildung 6: Unterschied zwischen einer klassischen und einer Fuzzy Menge	21
Abbildung 7: Übersicht über die 89 Bodenprofilstandorte (LK 100'000 © Swisstopo, BA067781).....	23
Abbildung 8: Überarbeitung der quartären Ablagerungen am Beispiel des Schwemmfächers 'God Margun Vegl'	30
Abbildung 9: Die geologische Substratkarte des Untersuchungsgebietes.....	31
Abbildung 10: Überblick des verwendeten Höhenmodell-Mosaiks	33
Abbildung 11: Kombination von Profile- und Plancurvature nach Dikau 1990	34
Abbildung 12: Die physiographischen Einheiten der Bodeneignungskarte 1:200'000.....	36
Abbildung 13: Datenflussdiagramm und Modellstruktur.....	38
Abbildung 14: Absolute Bodenprofilhäufigkeiten auf den jeweiligen Bodenbedeckungsklassen	39
Abbildung 15: Lineare Korrelation zwischen Höhe und Entwicklungsstufe.....	41
Abbildung 16: Lineare Korrelation zwischen Neigung und Entwicklungsstufe	42
Abbildung 17: Lineare Korrelation zwischen Profile Curvature und Entwicklungsstufe (negative Werte = konvexe Krümmung, positive Werte = konkave Krümmung).....	43
Abbildung 18: Submodule des Moduls 'terrestrische Böden'	45
Abbildung 19: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Höhe	46
Abbildung 20: Zugehörigkeitsgrade der drei unscharfen Höhenklassen TIEF, MITTELHOCH und HOCH im Gebiet des Val Minger.....	48
Abbildung 21: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Neigung	48
Abbildung 22: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Profile Curvature	50
Abbildung 23: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Höhenklassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden).....	52
Abbildung 24: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Neigungsklassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden).....	52
Abbildung 25: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Profile Curvature Klassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden).....	52
Abbildung 26: Schematische Darstellung des Inferenzprozesses am Beispiel des Bodentyps Rendzina (bezogen auf eine spezifische Rasterzelle).....	54
Abbildung 27: Defuzzifikationsschema am Beispiel der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe.....	55
Abbildung 28: Defuzzifikation der silikatischen und gemischten Bodenentwicklungsreihen.....	55
Abbildung 29: Räumliche Ungenauigkeiten der geomorphologischen Kartierung. Blau dargestellt sind die Alluvionen und Schwemmfächer im Gebiet von Buffalora	57
Abbildung 30: pH-Zuordnungsfunktion der silikatischen Bodenentwicklungsreihe.....	61
Abbildung 31: pH-Zuordnungsfunktion der gemischten Bodenentwicklungsreihe.....	61
Abbildung 32: pH-Zuordnungsfunktion der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe.....	62
Abbildung 33: Schematische Darstellung der pH-Zuordnung mittels den Zugehörigkeitswerten.....	62

Abbildung 34: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der silikatischen Bodenentwicklungsreihe	63
Abbildung 35: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der silikatisch-karbonatischen Bodenentwicklungsreihe	64
Abbildung 36: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe	64
Abbildung 37: Photo und Skizze von Profil N49	66
Abbildung 38: Photo und Skizze von Profil N28	67
Abbildung 39: Photo und Skizze von Profil N33	69
Abbildung 40: Photo und Skizze von Profil N02	71
Abbildung 41: Photo und Skizze von Profil N42	73
Abbildung 42: Photo und Skizze von Profil N08	75
Abbildung 43: Photo und Skizze von Profil N08	77
Abbildung 44: Photo und Skizze von Profil N37	80
Abbildung 45: Photo und Skizze von Profil N05	81
Abbildung 46: Photo und Skizze von Profil N26	83
Abbildung 47: Photo und Skizze von Profil E07.....	85
Abbildung 48: Photo und Skizze von Profil N43	87
Abbildung 49: Die Rendzina-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair).....	89
Abbildung 50: Humus-Karbonatgesteinsboden-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair).....	90
Abbildung 51: Karbonatgesteinsboden-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)	90
Abbildung 52: : 'Kein Boden'-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)	91
Abbildung 53: Die hypothetische Bodentypenkarte des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).....	92
Abbildung 54: Vergleich der 'Kein Boden'-Flächen mit den Felsflächen der Landeskarte 1:25'000 (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).....	93
Abbildung 55: Der gemittelte Oberboden-pH des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).....	102
Abbildung 56: Die gemittelte Bodenmächtigkeit des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).....	104
Abbildung 57: Übergänge zwischen zwei Höhenmodellen (Links: DHM-Mosaik mit 4 m und 25 m Zellengrösse, rechts: Neuberechnetes DHM mit 10 m Zellengrösse).....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lufttemperatur in °C von ausgewählten Monaten sowie Jahresmittel und Jahresschwankung der Messperiode 1901 -1940 (aus Bach, 1966)	2
Tabelle 2: Jahresniederschlag verschiedener Klimastationen (aus Zoller, 1995)	2
Tabelle 3: Überblick über die hierarchischen Klassifikationsstufen und ihren Kriterien.....	10
Tabelle 4: Überblick über die Bodenentwicklungsstufen in Anlehnung an die Bodenklassen der BGS & FAP	28
Tabelle 5: Die drei geologischen Substratklassen mit den jeweiligen Karbonatgehalten	29
Tabelle 6: Zuweisung der geologischen Kartierungseinheiten (Dössegger, 1987) zu einer Substratklasse (Mischgesteinssubstrat findet sich nur in den individuell überarbeiteten geologischen Einheiten)	29
Tabelle 7: Die zusammengefassten Bedeckungsklassen	32
Tabelle 8: Zuweisung der Vec25-Objekte zu den Bedeckungsklassen	32
Tabelle 9: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Höhe und Entwicklungsstufe	41
Tabelle 10: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Neigung und Entwicklungsstufe	42
Tabelle 11: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Profile Curvature und Entwicklungsstufe.....	43
Tabelle 12: Die modellierten Bodentypen des Moduls 'terrestrische Böden'.....	44
Tabelle 13: Neigungsklassen gemäss FAL	49
Tabelle 14: Regelbasis für die Standortkombination Wiese/Weide auf karbonatischem Substrat	53
Tabelle 15: Modellregeln der Auengesteinsböden.....	56
Tabelle 16: Ergänzende Modellregel der Auengesteinsböden	57
Tabelle 17: Modellregeln der Nassböden.....	58
Tabelle 18: Ergänzende Modellregel der Nassböden	58
Tabelle 19: Standorteigenschaften von Profil N49.....	65
Tabelle 20: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N49	66
Tabelle 21: Standorteigenschaften von Profil N28.....	67
Tabelle 22: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N28	68
Tabelle 23: Standorteigenschaften von Profil N33.....	69
Tabelle 24: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N33	70
Tabelle 25: Standorteigenschaften von Profil N02.....	71
Tabelle 26: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N02	72
Tabelle 27: Standorteigenschaften von Profil N42.....	73
Tabelle 28: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N42	74
Tabelle 29: Standorteigenschaften von Profil N08.....	75
Tabelle 30: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N08	76
Tabelle 31: Standorteigenschaften von Profil N48.....	77
Tabelle 32: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N48	78
Tabelle 33: Standorteigenschaften von Profil N37.....	79
Tabelle 34: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N37	80
Tabelle 35: Standorteigenschaften von Profil N05.....	81
Tabelle 36: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N05	82
Tabelle 37: Standorteigenschaften von Profil N26.....	83
Tabelle 38: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N26	84

Tabelle 39: Standorteigenschaften von Profil E07	85
Tabelle 40: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil E07	86
Tabelle 41: Standorteigenschaften von Profil N43.....	86
Tabelle 42: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N43	87
Tabelle 43: Flächenanteile der modellierten Bodenklassen (Entwicklungsstufen) des gesamten Untersuchungsgebiet und innerhalb des Nationalparks	94
Tabelle 44: Flächenanteile der modellierten Bodentypen des gesamten Untersuchungsgebiet und innerhalb des Nationalparks.....	95
Tabelle 45: Bodentypen-Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit den Bodenprofilen.....	96
Tabelle 46: Entwicklungsstufen-Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit den Bodenprofilen	96
Tabelle 47: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit U	97
Tabelle 48: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit V	98
Tabelle 49: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit W.....	98
Tabelle 50: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit S	99
Tabelle 51: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit R	99
Tabelle 52: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit KB	100
Tabelle 53: Flächenanteile der pH-Klassen des gesamten Untersuchungsgebietes und innerhalb des Nationalparks.....	103
Tabelle 54: Flächenanteile der Bodenmächtigkeits-Klassen des gesamten Untersuchungsgebietes und innerhalb des Nationalparks	105

1 Einleitung

1.1 Einführung und Kontext dieser Diplomarbeit

Der Nationalpark (SNP) stellt in der Schweiz eine einmalige Landschaft dar, in der sich die Natur seit über 90 Jahren ungestört entwickeln kann. Er ist das grösste zusammenhängende Gebiet in unserem Land, in dem die Landschaft sich selbst überlassen wird. Deshalb war der Nationalpark schon immer ein beliebtes Arbeitsgebiet für Forscher. Kein anderes Gebiet ist bisher wissenschaftlich so umfangreich und genau untersucht worden. Vor allem Zoologen und Botaniker finden hier ideale Bedingungen, die sie bezüglich der Ungestörtheit von Flora und Fauna sonst kaum noch antreffen. Aber auch geologisch und geomorphologisch wurde das Gebiet schon ausführlich dokumentiert.

Die bodenkundliche Untersuchung des Gebietes wurde im Zusammenhang mit vegetationkundlichen Studien Mitte der 20er Jahre von Hans Pallmann und Joasis Braun-Blanquet eingeleitet (Braun-Blanquet et. al., 1926). Die letzte ausführliche bodenkundliche Studie aus dem Nationalpark wurde von Fries in den 80iger Jahren veröffentlicht. Er untersuchte dabei die Bodenbildung unter der Pflanzengesellschaft ‚Caricetum Firmae‘ (Fries, 1985). In den letzten zehn Jahren entstanden nur noch zwei Diplomarbeiten mit bodenkundlicher Thematik. Obrecht & Schlupe (1994) gingen der Herkunft von hohen Schwermetallkonzentrationen am Munt la Schera nach und Budavary (1999) analysierte die Bodeneigenschaften von ungefähr 50 Bodenprofilen mit Hilfe multivariater statistischer Methoden.

Trotz dieser ausführlichen bodenkundlichen Studien existiert bis heute noch keine Bodenkarte im Gebiet des Nationalparks. Dies hat verschiedene Gründe. Erstens wäre eine konventionelle bodenkundliche Kartierung mit einer sehr grossen Anzahl zu grabenden Bodenprofilen verbunden, was mit dem Status als strenges Naturreiservat nicht zu vereinbaren wäre. Zweitens ist eine Kartierung immer mit erheblichem Kostenaufwand verbunden, und drittens werden Bodenkarten häufig in Zusammenhang mit landwirtschaftlicher Nutzungseignung oder ökologischer Baubegleitung erstellt. Da im Nationalpark weder landwirtschaftliche noch bauliche Tätigkeiten bewilligt werden, beschränkt sich das Interesse für eine Bodenkarte auf eine wissenschaftliche Grundlage zur Beantwortung von weiterführenden Fragestellungen.

Betreut und unterstützt wurde diese Arbeit von drei Institutionen. Das Geographische Institut stellte die ganze GIS-Infrastruktur zu Verfügung und war primär für die technische Betreuung durch Markus Egli, Britta Allgöwer und Stephan Imfeld verantwortlich. Die Abteilung Bodenökologie der WSL mit Peter Lüscher betreute die Arbeit vor allem im bodenkundlichen Bereich, unterstützte und finanzierte die Feldarbeiten. Die Verwaltung des Nationalparks sowie das Amt für Natur und Umwelt Graubünden stellten die GIS-Daten zur Verfügung und ermöglichten einen reibungslosen Verlauf der Feldarbeiten.

1.2 Fragestellungen und Zielsetzung

Grundsätzliches Ziel dieser Arbeit war der Versuch eine hypothetische Bodentypenkarte für das Gebiet des Nationalparkes zu generieren. Dabei wurde die Verwendbarkeit der GIS-Datengrundlagen analysiert und anschliessend ein eigener Modellansatz unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Feld- und GIS-Datensätze entwickelt.

Die Auswahl der verwendeten Datensätze und die Entwicklung eines Modellansatzes ist Bestandteil dieser Arbeit und stand zu Beginn noch nicht fest. Auf der Basis dieser Voraussetzungen wurden folgende Fragestellungen formuliert:

- Welche verschiedenen Bodentypen kommen im Nationalpark vor und welche Bodenbildungsprozesse dominieren die Entwicklung der Böden?

Diese Fragestellung hat vor allem deskriptiven Charakter und soll die wichtigsten Bodentypen und ihre Ausprägung thematisieren. Ausserdem werden ergänzend auch die relevanten Bodenbildungsprozesse beschrieben. Die Bodenklassifikation hat im Verlaufe der Zeit geändert und wird von den Bodenkundlern oft unterschiedlich verwendet. Dieser Umstand macht es notwendig, die in dieser Arbeit angewandte Nomenklatur der Böden an konkreten Beispielen zu veranschaulichen.

- Wie gut können aufgrund der Felddaten und bestehenden Arbeiten Modellregeln hergeleitet werden, mit denen sich das Verbreitungsmuster der Böden im Untersuchungsgebiet modellieren lässt?

Dabei geht es darum herauszufinden, ob sich anhand der vorliegenden Bodenprofile eine Korrelation zwischen Bodentyp und den Bodenbildungsfaktoren nachweisen lässt und wie diese Trends in einem Regelwerk implementiert werden können.

- Wie ist der fuzzy-basierte Modellansatz zu beurteilen?

Diese Fragestellung bezieht sich konkret auf die Verwendbarkeit der unscharfen Mathematik für eine Modellierung von Bodentypen. Dabei soll aufgezeigt werden, welche Vor- und Nachteile die Fuzzy-Logik bietet, wenn nur eine beschränkte Anzahl an Bodenprofilen zur Verfügung steht. Zudem geht es auch um eine allgemeine Beurteilung des vorliegenden Modellansatzes. Dabei sollen generelle Schwierigkeiten angesprochen werden, aber auch die Möglichkeit und Chancen solcher Modelle erörtert werden.

- Welche zusätzlichen Bodeneigenschaften lassen sich allenfalls anhand der verfügbaren Datengrundlagen herleiten?

1.3 Die Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt im östlichen Teil des Kantons Graubünden. Es befindet sich ungefähr in der Mitte des Alpenbogens, im Bereich der kontinentalen Hochalpen (Ott et al., 1997). Im Westen und Norden wird das Gebiet durch das Haupttal des Unterengadins begrenzt, im Osten erstreckt sich die Grenze entlang des Val S-charl und über den Ofenpass, und im Süden endet es wenige Kilometer hinter der Schweizerischen Landesgrenze zu Italien. Von den 426 km² Gesamtfläche sind ungefähr ein Drittel (135 km²) mit Wald und rund 28 % (120 km²) mit alpinen Rasen und Weiden bedeckt. Die restlichen 39 % (171 km²) bestehen aus vorwiegend vegetationslosen Felsgebieten und Schutthalden sowie Siedlungsgebieten und Gewässern (Zoller, 1995). Von den einst mächtigen Gletschern sind nur noch einige kleine Überreste geblieben. Diese befinden sich hauptsächlich an schattigen, nordexponierten Hängen über 2600 Meter, und bedecken nur noch ungefähr 0,3 % (1,1 km²) der Gesamtfläche.

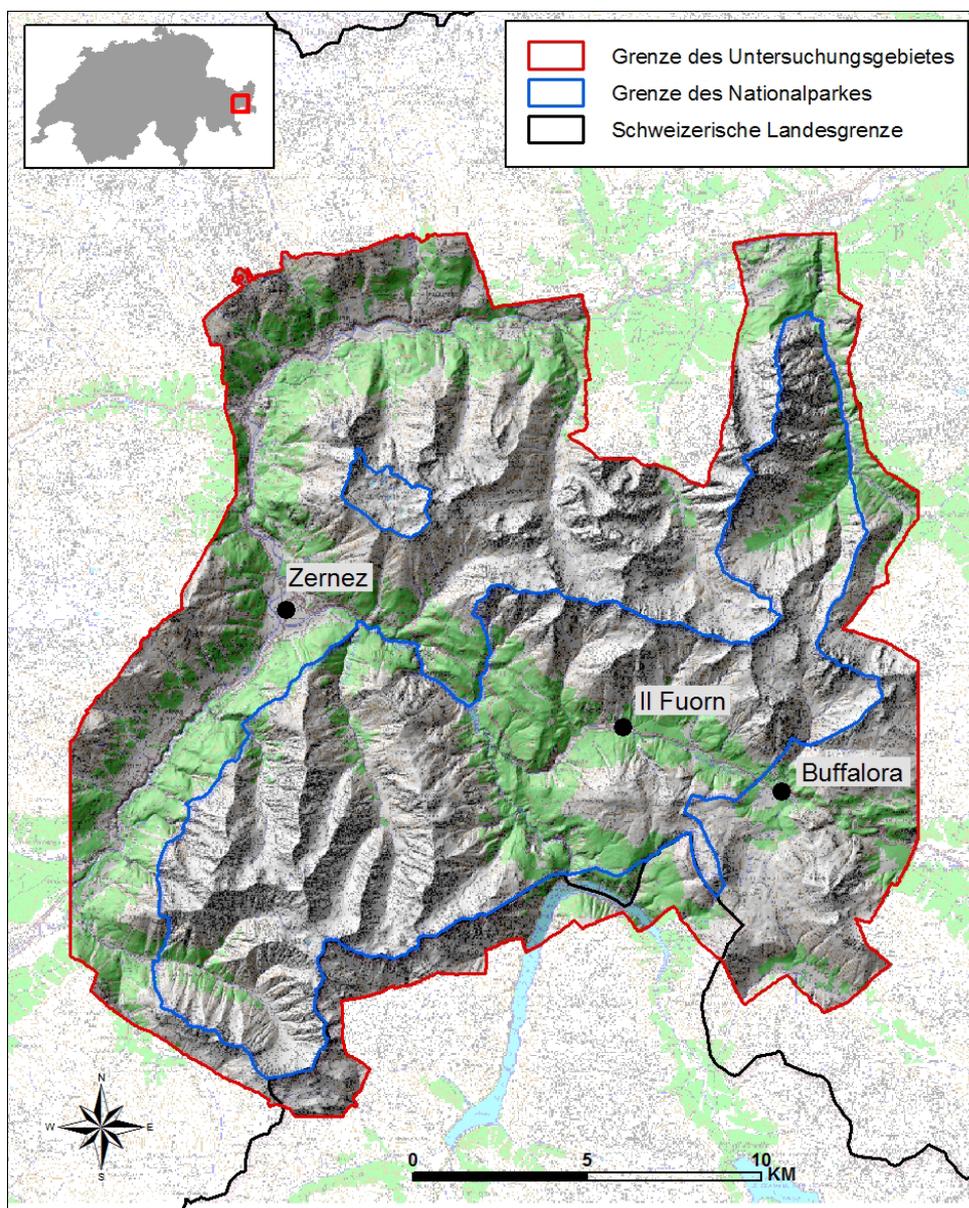


Abbildung 1: Überblick über das Untersuchungsgebiet (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).

Mit 3174 m.ü.M. ist der Piz Pisoc der höchste Punkt, während nur einige Kilometer nördlich davon entfernt das Bachbett des Inn bei Scuol auf 1168 m.ü.M. den tiefsten Punkt darstellt. Die durchschnittliche Höhe beträgt 2200 m.ü.M. Klimatisch steht das Gebiet unter dem Regime des inneralpinen Trockenklimas. Dieses ist charakterisiert durch Jahresniederschläge, die in der collin-montanen Stufe weniger als 850 mm betragen und mit steigender Höhe nur sehr langsam zunehmen. Noch in 1800 bis 2000 Meter Höhe erreichen sie oft weniger als 1000 mm (Zoller, 1995). Geologisch-tektonisch wird das Gebiet von der Engadiner Linie in zwei Teile getrennt. Südlich davon befinden sich vorwiegend die karbonatischen Engadiner Dolomiten, während nördlich der Engadiner Linie sich mehrheitlich kristalline Einheiten des Oberostalpin und Penninikums befinden. Diese Zweiteilung prägt die Verbreitung der Böden im Untersuchungsgebiet massgeblich.

Das Untersuchungsgebiet beinhaltet die ganze Fläche des Nationalparks, welche sozusagen das Kerngebiet darstellt, da ein grosser Teil der Bodenprofile innerhalb des Parkgebietes liegen. Die Begrenzung des Kartierungsgebietes folgt nicht den topographischen Gegebenheiten sondern hat den Ursprung in den vorhandenen GIS-Datensätzen. Grundsätzlich bestimmten die Ausdehnung des Digitalen Höhenmodells (DHM) sowie der geologischen Karte (Dössegger, 1987) den Perimeter. Zudem sollten möglichst viele Bodenprofilstandorte innerhalb des Kartenperimeters liegen, um die sonst schon beschränkte Anzahl Profile möglichst optimal nutzen zu können.

Der Hauptfokus für die Bodentypenmodellierung soll aber auf das Gebiet des Nationalparks gerichtet sein.

Weiterführende Informationen zur bodenrelevanten Charakteristik des Nationalparks und seiner Umgebung werden im Kapitel 2.1 bei den bodenbildenden Faktoren detailliert kommentiert.

2 Grundlagen

2.1 Bodenbildende Faktoren

Die Bodengenese und deren Geschwindigkeit werden von den bodenbildenden Faktoren bestimmt. Jenny (1941) beschreibt die Bodeneigenschaften als Produkt folgender Variablen:

$$\text{Bodeneigenschaften} = f(pt, cl, tp, t, org),$$

wobei *pt* durch das Ausgangsmaterial, *cl* durch das Klima, *tp* durch die Topographie, *t* durch die Zeit und *org* durch Organismen (oder Vegetation) umschrieben wird.

Diese Faktoren beeinflussen sich dabei wechselseitig, was in der Summe das Ausmass und die Richtung ihres Wirkens bestimmt. Zum Teil befinden sie sich aber auch mit dem Boden selbst in Wechselwirkung, was insbesondere für Flora und Fauna gilt. Das Klima wirkt auf den Boden auch in einer durch Relief und Vegetation modifizierten Form ein. Je nach der herrschenden Konstellation dieser Faktoren und der Dauer der Einwirkung entstehen Böden mit unterschiedlichen Entwicklungsstufen (Scheffer, 2002).

Im Folgenden sollen die bodenbildenden Faktoren und ihre Ausprägung, wie sie für das Gebiet typisch sind, beschrieben werden.

2.1.1 Klima und Wasserhaushalt

Gemäss Gensler (1978) ergibt sich das Klima einer Region aus der Gesamtheit der Jahr für Jahr mehr oder weniger gleichartigen Aufeinanderfolge von Wetterlagen. Die Bodenbildung wird durch die Faktoren Temperatur, Niederschlag, Einstrahlung und Windverhältnisse am stärksten beeinflusst. Diese Faktoren wirken bei der Verwitterung der Gesteine, beeinflussen die Entwicklung der Vegetation (Eintrag an organischem Material) und den Bodenwasserhaushalt.

Der Nationalpark und seine Umgebung liegen im Bereich der kontinentalen Hochalpen. Das Klima besitzt somit für schweizerische Verhältnisse kontinentalen Charakter mit milden Sommern und trockenen, kalten Wintern. Gegen Norden und Westen wird das Gebiet durch Gebirgszüge gegen den ozeanischen und insubrischen Klimaeinfluss gut abgeschirmt. Dies ist auch der Hauptgrund für die geringen Niederschläge.

2.1.1.1 Temperatur

Die bei der Bodenentwicklung wirksame Energie ergibt sich im Wesentlichen aus der Intensität und der jahreszeitlichen Verteilung der Strahlungsbilanz (Differenz von ein- und ausgestrahlter Sonnenenergie). Die von der Strahlungsbilanz abhängige Bodentemperatur wirkt direkt auf die Prozesse der Zersetzung, Verwitterung und Mineralbildung. Die Zersetzung und chemische Verwitterung werden durch steigende Temperaturen beträchtlich intensiviert (Scheffer et al., 2002). Tabelle 1 gibt Auskunft über die mittleren Temperaturverhältnisse in den Monaten Januar, April, Juli und Oktober sowie das Jahresmittel und die Jahresschwankung. Letztere errechnet sich aus der Differenz der Temperaturmittel des wärmsten und des kältesten Monats. Auffällig sind die verhältnismässig tiefen Temperaturen im Winter sowie

die hohen jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur und damit verbunden auch der Strahlungsintensität.

Tabelle 1: Lufttemperatur in °C von ausgewählten Monaten sowie Jahresmittel und Jahresschwankung der Messperiode 1901 -1940 (aus Bach, 1966)

Station	Höhe ü.M.	Jan.	April	Juli	Okt.	Jahresmittel	Jahresschwankung
Buffalora	1968	-10.5	-1.1	9.8	1.0	-0.2	20.3
S-charl	1810	-6.8	1.1	11.2	3.6	2.2	18.0
Scuol	1253	-5.8	4.8	14.9	5.3	4.8	20.7
Sta. Maria	1411	-3.9	4.3	14.5	5.5	5.1	18.4

2.1.1.2 Niederschlag

Durch Niederschläge wird das Bodenwasserhaushalt gesteuert, womit Lösungs- und Verlagerungsvorgänge ermöglicht werden. Auf die Bodenentwicklung wirkt sich vor allem jener Anteil der Niederschläge aus, der als Sickerwasser das Solum passiert und dabei Lösungsprodukte abführt (Scheffer et al., 2002).

Die Niederschläge sind im Nationalpark und seiner grösseren Umgebung mit weniger als 800 mm im Jahr die tiefsten des ganzen Kantons Graubünden. Die Niederschläge nehmen mit steigender Meereshöhe nur sehr langsam zu und erreichen noch in 1800 bis 2000 Meter oft Werte kleiner als 1000 mm (Zoller 1995). Die jährliche Zahl der Tage mit Niederschlag ist mit unter 120 Tage gering, wobei die monatlichen Niederschlagsmaxima in den Sommermonaten Juli und August liegen, die entsprechenden Minima im Januar und Februar. Dies entspricht weitgehend dem mitteleuropäischen Typus (Bach, 1966).

Die Jahresniederschlagswerte aus Tabelle 2 beziehen sich auf den Zeitraum zwischen 1900 und 1960 und dürften sich in der Zwischenzeit nur geringfügig verändert haben.

Tabelle 2: Jahresniederschlag verschiedener Klimastationen (aus Zoller, 1995)

Station	Höhe ü. M.	Jahresniederschlag (in mm)
Scuol	1253	707
Santa Maria	1411	770
Susch	1430	737
S-charl	1810	780
Cluozza	1885	930
Buffalora	1968	974
Alp Murter	2320	970
Stabelchod	2440	1270

Die Jahresniederschläge sind sowohl in Scuol und Santa Maria, als auch in Susch sehr gering. Höher gelegene Stationen wie Buffalora oder Cluozza erhalten zwar mehr, für diese Höhenlage aber immer noch wenig Niederschlag.

Einen wichtigen Schutz vor der winterlichen Kälte bietet die Schneedecke, welcher besonders oberhalb der Waldgrenze eine grosse Bedeutung zukommt. Dort fehlt die schützende Funktion des Waldes, die Böden sind stärker Wind und Wetter ausgesetzt. Gemäss Untersuchungen von Braun-Blanquet et al. (1954) ist die Höhe der Schneedecke mit 70 -100 cm in der Umgebung um Il Fuorn verhältnismässig gering. Diese kann anhand der Flechtenverteilung an

Baumstämmen abgeschätzt werden. Zudem ist die Schneedecke ein zusätzlicher Wasserspeicher, welcher in der Ausaperungsphase im Frühling eine Menge Schmelzwasser dem Boden zu Verfügung stellt. Generell kann gesagt werden, dass die Mächtigkeit der Schneedecke stark von den lokalen Niederschlags-, Wind- und Topographieverhältnissen abhängig ist.

2.1.1.3 Wasserhaushalt

Bei den geringen Niederschlägen im Unterengadin stellt sich schnell die Frage nach der klimatischen Wasserbilanz. Sie ist die Differenz aus Jahresniederschlag und potentieller Evapotranspiration. Positive Werte bedeuten Wasserüberschuss, negative Wassermangel. Die Jahreswerte kennzeichnen dabei die klimabedingte Vernässung der Böden und die Sickerwassermengen (AG Boden, 1994).

Die Jahresverdunstung liegt nach Gensler (1978) bei durchschnittlich rund 300 mm. Die Wasserbilanz ist somit über das ganze Jahr gesehen sicher im positiven Bereich. Der Wassergehalt des Bodens kann aber grossen Schwankungen unterliegen, da die Niederschläge oft in Form von Schauern auftreten. Während längeren Trockenperioden trocknen die durchlässigen Böden (auf vorwiegend karbonatischem Ausgangsgestein) im Allgemeinen stark aus, was zu Wasserstress bei der Vegetation führt. Vor allem an Hang- und Kuppenlagen müssen die Pflanzen den Wasserstress tolerieren können, da die Perkolation an diesen Standorten am grössten ist.

Zusätzlich kann noch erwähnt werden, dass die Bewölkung der Region mit 60 % (Station Buffalora) recht gering ist, und wegen der Höhenlage sich daraus eine starke Insolation (= direkte Sonnenbestrahlung der Erdoberfläche) ergibt. Auffallend ist ausserdem die Wind- und Gewitterarmut der Region (Gensler 1978).

2.1.2 Geologie

Die Zusammensetzung und Beschaffenheit der bodenbildenden Gesteine ist einer der wichtigsten Faktoren bei der Entstehung eines Bodens. Er bestimmt im Wesentlichen mit, welcher Bodentyp entsteht und welche Eigenschaften ein Boden besitzt. Die Geschwindigkeit der Gesteinsverwitterung und damit auch der Bodenbildung hängt stark von der Zusammensetzung und der Verwitterungsresistenz der in den Gesteinen enthaltenen Minerale ab. Die Lösungsverwitterung eines sauren, kristallinen Gesteins verläuft beispielsweise langsamer als jene eines karbonathaltigen Sedimentgesteins (Walther et al., 2004). Die Richtung und Intensität der Bodenentwicklung hängen somit stark von Gefüge, Mineralbestand und Körnung des Ausgangsgesteins ab.

Der Nationalpark und seine Umgebung befinden sich im Gebiet der tektonisch höchsten Bauelemente der Alpen, den Ostalpen. Die nach ihnen benannten ostalpinen Decken beanspruchen beinahe das gesamte Engadin. Diese Einheiten befinden sich hoch oben im alpinen Deckenstapel und sind somit nur schwach metamorph, wurden also im Zuge der Alpenfaltung nur geringfügig deformiert. Sie sind Teile des afrikanischen Kontinents, welche bis zu 100 km weit auf den europäischen überschoben worden sind (Labhart, 1992). Das Kartierungsgebiet liegt fast ausschliesslich im oberostalpinen Bereich. Ausser im Gebiet zwischen Scuol und Ardez im Unterengadin treten penninische Decken, das so genannte Unterengadiner Fenster, auf. Das Oberostalpin lässt sich grundsätzlich in einen kristallinen und einen sedimentären Bereich gliedern. Nördlich der Engadiner Linie befindet sich die Silvretta-Decke mit fast ausschliesslich kristallinen Gesteinen, während südlich davon die Engadiner Dolomiten anschliessen. Diese bestehen im Nationalpark mehrheitlich aus mächtigen Dolomit- und Kalkgesteinsschichten, welche während der Trias auf einer ständig absinkenden marinen

Plattform abgelagert wurden (Labhart, 1992). Weiter östlich im Sesvennagebiet und im Münstertal liegen mächtige Sedimentschichten des Perms, der so genannte Münstertaler Verrucano (Dössegger, 1987).

Gemäss Trümpy et al. (1997) bestehen die Oberostalpinen Decken im Wesentlichen aus sechs übergeordneten Gesteinsgruppen, die nachfolgend beschrieben werden (vgl. Abbildung 2):

Das kristalline Grundgebirge kommt vor allem nördlich der Engadiner Linie in Form von Gneisen und Amphiboliten (metamorphe Basalte) der Silvretta-Decke vor. Aber auch am nordwestlichen Fuss der Pisoc-Gruppe und im Val Tavrü tritt das kristalline Grundgebirge zu Tage. Es besteht dort aber mehrheitlich aus hellen Muskovit-Orthogneisen.

Die Gruppe des schon angesprochenen Münstertaler Verrucanos (Chazfora-Formation) und die Fuorn-Formation umfassen detritische Sedimentgesteine des Perms und der Untertrias, die aus Sandsteinen, Tonschiefern und Konglomeraten bestehen. Diese wurden durch die Abtragung des variszischen Gebirges gebildet. Neben der geringmächtigen Fuorn-Formation tritt die Chazfora-Formation mit ihren grün-voioletten Sandsteinen, Konglomeraten und Tonschiefern vor allem um das Gebiet des Munt la Schera zu Tage.

Die Mitteltrias-Karbonatgesteine bilden eine mehrere hundert Meter dicke Gesteinsgruppe, die den S-charl-Kalk sowie den Turettas-, Vallatscha- und Parai-Alba-Dolomit umfasst. Besonders markant ist der düster grau anwitternde Vallatscha-Dolomit. Sie sind im Gebiet um Il Fourn, am Munt la Schera, im Val S-charl und am Piz Vallatscha anzutreffen und zerfallen meist zu eher kleinblockigem Schutt.

Die Raibler Gruppe (Carnien) der unteren Obertrias ist oft zwischen den Mitteltrias-Dolomiten und dem mächtigen Hauptdolomitschichten als schuttbedecktes Band anzutreffen. Die Gesteine wurden in einem flachen, warmen Meer abgelagert. Sie bestehen vorwiegend aus Rauhackeln (zellige, brecciöse Karbonatgesteine), gelblichen dünnbankigen Dolomiten und vereinzelt aus Tonschiefer und Sandsteinen.

Die bis zu 1500 Meter mächtige Hauptdolomit-Gruppe (Norien) wird nördlich des Ofenpasses von silbergrauen, oft sehr brecciösen, mittel- bis dickbankigen Dolomiten gebildet. Diese wurden im Gezeitenbereich eines riesigen Flachmeeres abgelagert. In einigen Unterformationen (zum Beispiel beim Murter-Plattenkalk, Quattervals-Formation) treten auch Verkieselungen und vereinzelt Tonschiefer auf.

Der oberste Teil des Hauptdolomits ist kalkig ausgebildet und leitet zu den Kössener Schichten (Kössen-Formation) über. Diese besteht aus Wechseln zwischen Schiefertonen, Mergeln, Dolomiten und fossilreichen Kalken. Die Vegetationsfeindlichkeit der Hauptdolomit-Schutthalden ist gewiss auch ein Grund dafür, dass der SNP gerade in diesem Gebiet errichtet werden konnte.

Die Jura- und Kreideeinheiten finden sich nur vereinzelt in der Ortler-Decke der Val Trupchun. Dominierend sind die dünnbankigen und zum Teil kieseligen Kalke und Schiefermergel der Allgäu-Formation, welche dort einige hundert Meter mächtig sind.

Für eine detailliertere Beschreibung der geologischen Verhältnisse wird auf Trümpy (1997) verwiesen.

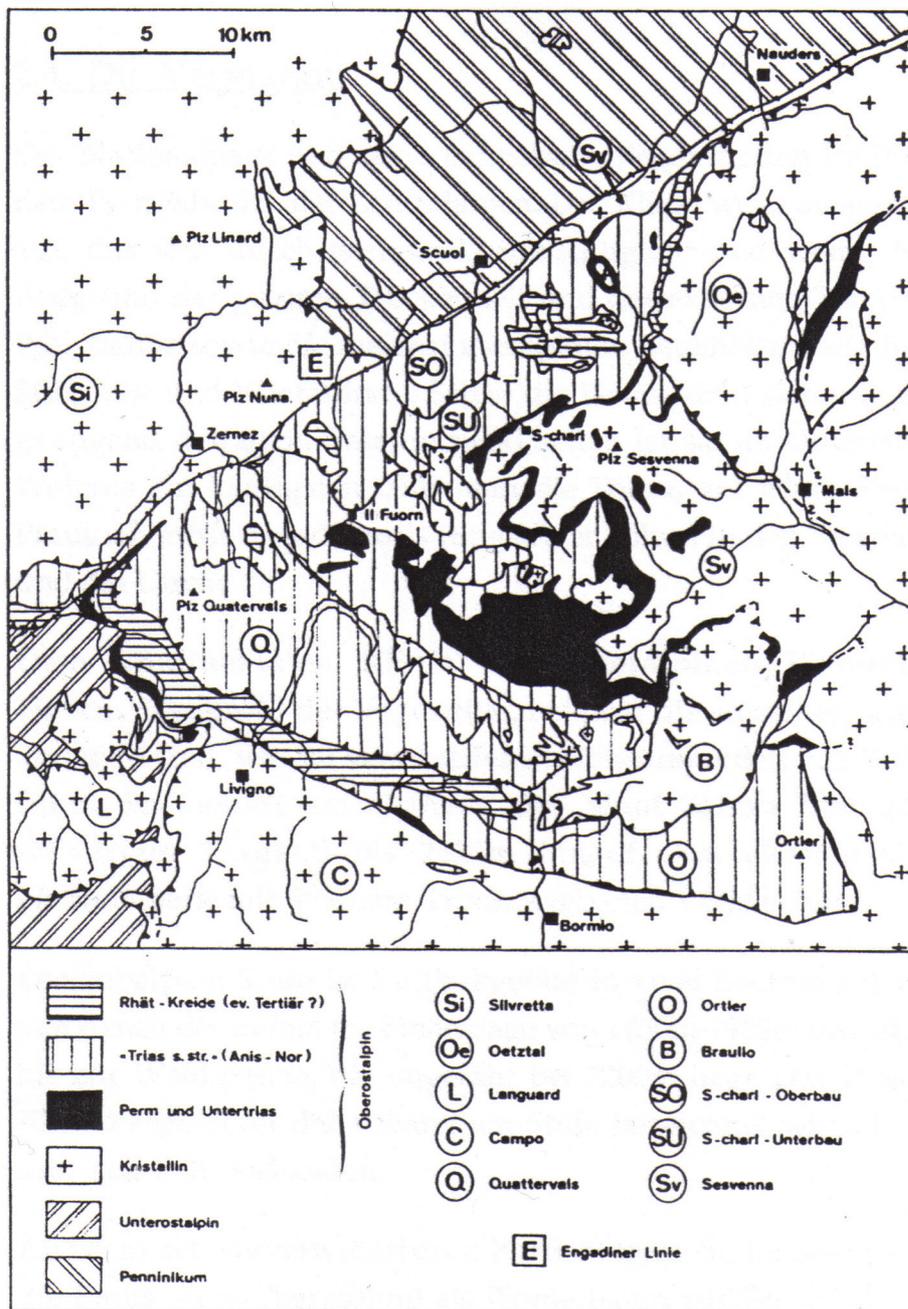


Abbildung 2: Vereinfachte geologisch-tektonische Karte (Aus Terra Grischuna, 1976 / 3)

2.1.3 Vegetation und Fauna

Unter diesem Faktor ist mit Ausnahme des Menschen die Gesamtheit der Organismen, die einen Einfluss auf den Boden ausüben, zu verstehen. Der Einfluss des Menschen wird in einem eigenen Kapitel angesprochen.

Der Boden bildet zusammen mit Flora und Fauna ein Ökosystem, welches von den anderen Bodenbildungsfaktoren als Ganzes beeinflusst wird. Pflanzen reduzieren zunächst einmal die Oberflächenerosion und beeinflussen so die Bodenbildung massgebend, indem sie den Boden bedecken und mit ihren Wurzeln den Oberboden zusammenhalten (Walthert et al., 2004). Die Pflanzendecke wirkt sozusagen wie ein Schutzmantel, um zum Beispiel den Aufprall von

Niederschlag zu mildern. Auf diese Weise werden das Ausspülen und Auswehen fester Bodenteilchen (Winderosion) durch Wasser und Wind sowie der Aggregatzerfall und das Dichtschlammern der Böden gemildert oder sogar verhindert (Scheffer et al., 2002). Zudem wirken sich die Qualität und Zusammensetzung der Streu und die Wurzeln der unterschiedlichen Pflanzengesellschaften massgeblich auf die Art der Abbauprodukte, die Verlagerungsprozesse, den pH im Boden und die Bodenfauna aus. Die Bodentiere und Mikroorganismen wandeln das organische Ausgangsmaterial in Huminstoffe um.

Die geologischen und klimatischen Verhältnisse widerspiegeln sich deutlich in der Vegetation des Nationalparks und seiner Umgebung. Das Klima besitzt stark kontinentalen Einschlag, was durch das Vorherrschen der Föhren und der Trockenrasenvegetation in tieferen und hohen Lagen eindeutig angezeigt wird. Das ganze Kartierungsgebiet ist Teil des inneralpinen Trockengebietes, des Föhrenbezirks der Zentralalpen. Aufgrund der Trockenheit und den extremen Temperaturdifferenzen (vgl. Kapitel 2.1.1) fehlen die Weisstanne sowie die meisten mesophilen Laubhölzer wie Buche, Ulme, Trauben, Stieleichen und Winterlinde, welche im Gegensatz am Nord- und Südfuss der Alpenkette ausgedehnte Bestände bilden (Blanquet, 1954). Dies wirkt sich auf die Abbauprodukte der Streu aus, da Nadelstreu im Allgemeinen schlechter abgebaut wird als Laubstreu. Innerhalb des Nationalparks sind die beiden Unterarten Legföhre (*Pinus mugo* ssp. *uncinata*) und die aufrechte Bergföhre (*Pinus mugo* ssp. *montana*) mit Abstand am verbreitetsten. Generell weist die Bergföhre eine breite ökologische Amplitude auf, was sie wegen ihrer Unterlegenheit gegenüber anderen Baumarten oft zwingt, die ungünstigeren Standorte zu besiedeln. Die Legföhre ist darum an relativ flachgründigen, trockenen Steilhängen anzutreffen, namentlich im Val Cluozza, dem Val Minger und an den Osthängen des Val dal Spöl. Sie ist das Pioniergehölz bei der Besiedlung von beweglichen Schutthalden und Lawinenrutschen und bildet im Nationalpark die obere Waldgrenze bis durchschnittlich 2300 Meter. In tieferen Lagen des Ofenpassgebietes beherrscht, neben einigen wenigen Lärchen-Arvenbeständen, die aufrechte Bergföhre den Bergwald. Auf den vorwiegend silikatischen Gesteinen des Unterengadins und auch im Val Trupchun sind Lärche (*Larix decidua*), Arve (*Pinus cembra*) und zum Teil auch Fichte (*Picea abies*) die dominierenden Baumarten.

Über der Waldgrenze dominieren die Polster-Seggen (*Caricetum fimaie*). Diese äusserst frostresistente Pioniergesellschaft besiedelt potentiell alle Standorte, insbesondere die windbestrichenen, im Winter schneefreien Kuppen und Rücken (Bach, 1966). Die Vorherrschaft von unentwickelten Karbonatböden führt zusammen mit der Trockenheit des Klimas zu einem einseitigen, artenarmen aber ausgesprochen charakteristischen Florenbestand von vorwiegend xero- und basiphilen Arten. Deutlich zeigen dies Vergleichsuntersuchungen von Braun-Blanquet (1954) an Gipfelstandorten mit unterschiedlichen Substrattypen. Der Piz Sesvenna als artenreichster Silikatgipfel beherbergt oberhalb von 3000 Metern noch 43 Blütenpflanzen, während auf dem Piz Nair als artenreichster Kalkgipfel im Gegensatz nur noch 22 Blütenpflanzen vorkommen. Die Lebensbedingungen in der oberen alpinen Stufe sind für Pflanzen auf silikatischem Substrat somit viel günstiger als auf kompaktem Dolomit. Nach Zoller (1995) sind in den tieferen Lagen des Unterengadins auf verhältnismässig flachen und somit intensiv bewirtschafteten Flächen Fettwiesen verbreitet, während die höheren Standorte im Allgemeinen aus Magerwiesen und Weiden bestehen.

Die Vegetation des Nationalparks und des Unterengadins wird stark vom Wild beeinflusst. Dies zeigt sich vor allem an den Verbiss- und Tritts Spuren besonders im Nationalpark, wo keine aktiven Schutzmassnahmen (z.B. Bestandesregulierung) ergriffen werden dürfen. Die heutige Huftierdichte scheint aber gemäss forstlichen und vegetationskundlichen Untersuchungen die Verjüngung und Ausbreitung des Waldes nicht zu gefährden, sie werden dadurch nach Krüsi et al. (1996) sogar eher gefördert. Für eine ausführlichere Beschreibung der Verbreitung von Flora und Fauna wird an Zoller (1995) und Bach (1966) verwiesen.

2.1.4 Geomorphologie

Der Einfluss von geomorphologischen Prozessen auf die Bodenentwicklung ist äusserst vielfältig und nicht eindeutig von Bodenbildungsprozessen trennbar, da es oft nur auf die massstäbliche Betrachtung ankommt und viele physikalische sowie chemische Prozesse in beiden Bereichen ablaufen. Karstbildung und Bodenentkarbonatisierung beispielsweise sind im Endeffekt der gleiche chemische Prozess. Die wichtigsten geomorphologischen Prozesse lassen sich stark vereinfacht in fluviale, gravitative, glaziale, periglaziale Bereiche unterteilen. Fluviale Prozesse wirken im Einflussbereich von Flüssen und Bächen. Sie lagern und verschieben Ausgangsmaterial und schaffen somit die Grundlage für die Böden oder charakterisieren diese sogar (Auenböden). Unter gravitativen Prozessformen sind Steinschlag, Bergstürze und Lawinen zu verstehen, während bei denutativen Prozessen der Einfluss von Wasser hinzukommt, was zu Gleit- und Rutscherscheinungen oder Murgängen führt (Reusser, 1990). Diese Prozesse führen oft zu einer erheblichen Störung der Bodenentwicklung, indem sie den rezenten Boden überschütten, verlagern oder ganz wegräumen. Auch bei glazialen Prozessen wie zum Beispiel einem Gletschervorstoss wird die Bodenbildung oft unterbrochen. Ausserdem hinterlässt ein Gletscher Moränenschutt (als Wall- oder Grundmoräne), auf dem sich spezielle Böden bilden können. Bei periglazialen Prozessen spielen Gefrier- und Auftauprozesse sowie Solifluktionerscheinungen (Beispiel Girlandenböden) eine grosse Rolle. Im Allgemeinen ist auf permanenten Permafrostvorkommen die Bodenentwicklung aber wegen der vegetationsfeindlichen Verhältnisse stark gehemmt.

Das ganze Untersuchungsgebiet war mit Ausnahme der höchsten Gipfel während den pleistozänen Eiszeiten mehrmals mit Eis bedeckt. Die letzte Kaltzeit, die Würm-Eiszeit (110'000 – 12'000 v. Chr.) überprägte die Ablagerungen und Geländeformen der älteren Eiszeiten stark und hinterliess ihrerseits einen reichen glazialen Formenschatz. Das Oberengadiner Eis staute sich damals an der Talenge bei Zernez und Susch. Ein Teil floss dabei als Transfluenz über den Ofenpass in Richtung Val Venosta (Italien) ab. Der Fund von Graniterratiker aus dem Berninagebiet lässt den Schluss zu, dass der Inngletscher in etliche Seitentäler (Val Varusch, Val dal Fuorn, Val Plavna) des Unterengadins eindrang und die lokalen Gletscher stark an ihrer Ausbreitung hinderte. Das Nationalparkgebiet war damals bis auf eine Höhe von etwa 2600 bis 2700 Meter mit Eis bedeckt (Braun-Blanquet, 1954). Darunter entstanden als subglaziale Entwässerungsrinnen die heutigen Schluchten der Spöl und des Fuornbaches. Von diesen einst gewaltigen Eismassen sind heute im Untersuchungsgebiet nur noch kleine Firnfelder und Minigletscher vorhanden, die sich hauptsächlich an nordexponierten Hängen über 2600 Meter befinden und zusammen gerade noch ungefähr einen Quadratkilometer bedecken. Dafür kann der periglaziale Formenschatz im Nationalpark hervorragend studiert werden. Keller (1988) schätzt, dass auf westlichen bis nordöstlichen Expositionen Permafrost bereits ab 2600 Meter, während auf östlich bis südwestlichen Expositionen erst ab Höhen von über 2900 Meter wahrscheinlich ist. Im Val Sassa und Val da l'Aqua existieren zudem zwei mächtige Blockgletscher. Aber auch Solifluktionsformen lassen sich in vielen Tälern oberhalb der Waldgrenze beobachten. Besonders auffällig und imposant sind die ausgedehnten Trockenschutthalden und Schuttkegel aus Dolomitgestein, die sich grösstenteils nach dem Ende der letzten Eiszeit bildeten, als der Permafrost auftaute und die schuttbedeckten Hänge in Bewegung gerieten. Natürlich werden diese Schuttmassen auch heute weiterhin durch Steinschlag genährt (Trümpy, 1997).

2.1.5 Topographie

Die Topographie umfasst Exposition, Neigung, Höhenlage und Geländeform. Die Wirkung des Wassers, der Organismen und der Schwerkraft wird durch die Topographie in vielfältiger Weise beeinflusst. Mit der Höhenlage verändern sich vor allem die klimatischen Verhältnisse. Generell nehmen die Temperaturen ab, die Niederschlagsmengen jedoch zu. Dadurch ergibt sich eine Höhenzonalität von Bodeneigenschaften und Vegetation, wie sie auch von Braun-Blanquet und Jenny (1926) beschrieben wird. Auch die Exposition, die Ausrichtung des Hanges zur Himmelsrichtung, beeinflusst über die Strahlungsverhältnisse die Temperatur und die Wasserbilanz. Die Schneedecke beispielsweise bleibt im Nationalpark an nordexponierten Lagen bis zu sechs Wochen länger liegen als an sonnigen Südlagen. Die Geländeneigung wirkt über die Schwerkraft auf den Boden. Je steiler ein Hang ist, desto grösser ist seine Erosionsanfälligkeit und desto flachgründiger ist er im Allgemeinen (Jenny, 1980). Dieser Effekt ist vor allem in spärlich bewachsenen Gebieten nicht zu unterschätzen, da dort keine stabilisierende Vegetationsdecke vorhanden ist. Die Geländeformen müssen in Verbindung mit dem Massstab betrachtet werden. Auf der Makroebene lassen sich grundsätzlich Grossformen wie Berge, Täler und Ebenen unterscheiden. Auf der Meso- und Mikroebene findet eine weitere Differenzierung nach Hügel, Hänge, Mulden, Hangrücken, Kuppen statt. Auf Kuppen sind die Böden wegen langer Bodenfrostperioden, Winderosion und wegen geringer Sickerwassermengen generell flachgründiger als in Mulden (Turner & Blaser, 1977).

Im Kartierungsgebiet verläuft die Mehrzahl der Täler in ungefährer Nord-Süd Richtung. Einzig das Val Trupchun, Val dal Fuorn sowie das nördliche Unterengadin haben eine ausgeprägte Ost-West Ausrichtung. Dies hat vor allem Auswirkungen auf die Strahlungsintensität und damit auf das Mikroklima. Wie schon erwähnt beträgt die mittlere Höhenlage aufgrund der hochgelegenen Täler ungefähr 2200 Meter. Folglich ist die Reliefenergie, also der mittlere Höhenunterschied zwischen Berg und Tal für alpine Verhältnisse relativ gering. Charakteristisch für den Nationalpark sind die Gipffluren, also weite Bereiche, in denen alle Berge ungefähr gleich hoch sind. So haben nicht weniger als 15 Berggipfel eine Höhe ungefähr 3100 Meter (Trümpy, 1997).

2.1.6 Mensch

Die Entwicklung der Böden wird je länger je mehr durch den Menschen beeinflusst. Vor allem Kultivierungs- und Baumassnahmen zerstören, hemmen oder beschleunigen die Bodenentwicklung nachhaltig. Bei Bautätigkeiten wird der Boden oft weggeräumt und versiegelt oder mit schweren Maschinen befahren, was zu irreversiblen Bodenverdichtungen führen kann. Bei der Kultivierung wird eine Vielzahl von chemischen Mitteln zur Düngung, Kalkung oder Spritzmittel ausgebracht (Wernli, 2004). Der Ackerbau zerstört durch Pflugarbeit die ursprüngliche Horizontierung, schafft einen künstlichen Pflughorizont, belüftet somit aber auch den Boden und beschleunigt somit den Abbau organischer Substanzen (Scheffer, 2002). Zusätzlich spielen indirekte Einflüsse wie Veränderungen des Klimas, Reliefs, Vegetation oder der hydrologischen Verhältnisse eine grosse Rolle. Gerade grossflächige Veränderungen der Vegetation (Rodung) führen zu Erosion und Degradierung der Böden. Über Niederschläge und das Grundwasser werden oft auch vom Menschen produzierte Schadstoffe in den Böden angereichert.

Das Gebiet des Unterengadins wurde schon in prähistorischer Zeit besiedelt. Der damalige Einfluss auf Boden und Vegetation fand aber nur sehr punktuell statt und war folglich im gesamten äusserst gering. Durch das lokale Vorkommen von abbaubaren Erzen und den Waldreichtum ergab sich eine erste bedeutende Nutzung im Zeitraum zwischen dem 14. und 17.

Jahrhundert (Parolini, 1995). Das Holz aus den ausgedehnten Föhrenwäldern wurde vorwiegend für die Erz- und Eisenverarbeitung vor Ort verwendet. Von der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts kam es zu grossflächigen Waldrodungen, da zusätzlich Brennholz für die Saline Hall in Tirol benötigt wurde. Erst nach 1835 wurden erste Massnahmen zur Einschränkung der Kahlschlagwirtschaft ergriffen. Aber auch der Ackerbau- und die Viehwirtschaft wurden seit dem 14. Jahrhundert betrieben. Die während 600 Jahren teilweise sehr intensiven Nutzungen führten vor allem zu Veränderungen bei der Ausdehnung und Struktur der Wälder und Pflanzengesellschaften sowie bei der Ertragskraft der Böden. Offensichtlich ist, dass die grossflächigen Kahlschläge die grössten Auswirkungen hatten. Die deutlichsten Spuren im Nationalpark lassen sich heute an den Waldlichtungen- und Schneisen sehen, die für alpwirtschaftliche und verkehrstechnische Zwecke gerodet wurden. Durch die starke Wildäsung und der damit verbundenen Düngung werden diese Flächen auch nur langsam durch den Wald zurück gewonnen. Die Kahlschläge und Brandrodungen führten teilweise zu verstärkter Erosion, Erdrutschen und Rufenbildung, welche beispielsweise in God dal Fuorn oder im God Val Brüna gut sichtbar sind (Parolini 1995).

2.2 Klassifikationsysteme

2.2.1 Einführung

Im letzten Jahrhundert entstanden in verschiedenen Teilen der Erde länderspezifische Bodenklassifikationssysteme, die auf die jeweiligen Bedürfnisse des betreffenden Landes zugeschnitten wurden. Die heutige Bodensystematik geht vor allem auf den Russen Dokuchaev zurück, der die Böden als eigenständige Naturkörper betrachtete und sie aufgrund der klimabedingten Vegetation und des Klimas klassifizierte (Scheffer et. al., 2002). In Deutschland und den USA ging man ähnlich vor, berücksichtigte jedoch die Einflüsse der übrigen Entwicklungsfaktoren stärker. Zahlreiche Bodenkundler wie Hans Jenny (Jenny, 1941), Hans Pallmann oder Walter Kubiena haben später die Prozesse der Bodenentwicklung in den Vordergrund gestellt. Dies führte dazu, dass sich mehrheitlich die morphogenetischen Klassifikationssysteme durchsetzen konnten, welche einerseits analytische Merkmale, Bodenbildungsprozesse als auch die Entwicklungsgeschichte berücksichtigten.

Die Bodenklassifikation der Schweiz geht auf Hans Pallmann zurück, der in den 40iger Jahren ein erstes pedogenetisches System entwickelte (Fitze, 1998). Dieses wurde in den 60iger Jahren mit dem Aufkommen der Bodenkartierung von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) und in den Folgejahren von der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) weiterentwickelt.

Die US-amerikanische Systematik, die sogenannte Soil Taxonomy, basiert nach wie vor auf einer Klassifizierung nach analytischen Bodenmerkmalen, unabhängig von der Entstehung des Bodens. Diese bildete in den 60iger Jahren die Grundlage für die FAO-Weltbodenkarte, welche als erste internationale Bodennomenklatur angesehen werden kann. Dieses System unterscheidet 26 Bodeneinheiten, die wiederum in jeweils drei bis sechs Untereinheiten differenziert werden (Scheffer et al., 2002). Eine Weiterentwicklung der FAO-Nomenklatur wurde 1998 von der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft mit dem ‚World Reference Base for Soils‘ (WRB) geschaffen. Die WRB dient primär dem Ziel Definitionen von Bodenhorizonten und Eigenschaften anzubieten, sowie Klassifikationsmöglichkeiten aufzuzeigen, die zu einer Annäherung der verschiedenen nationalen Systematiken führen kann.

Die heutzutage in den verschiedenen Staaten der Erde benutzten Klassifikationen unterscheiden sich sowohl im Gliederungsprinzip als auch in der Benennung der einzelnen Böden. Eine

Parallelisierung der verschiedenen Systeme ist schwierig, da verschiedenartige Böden teilweise gleich benannt werden oder für den gleichen Bodentyp verschiedene Namen existieren. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass auch innerhalb eines Klassifikationssystems die eindeutige Zuordnung oftmals Schwierigkeiten bereitet. Die Übergänge zwischen Bodentypen, Horizonten und sonstigen Bodeneigenschaften sind in der Natur mehrheitlich fließend. Im Weiteren ist zu beachten, dass die Anwendung eines Klassifikationssystems Erfahrung und Wissen im Umgang mit der Bodenansprache voraussetzt.

2.2.2 Die Bodensystematik nach BGS und FAP

Für diese Diplomarbeit wurde die Nomenklatur der Schweizerischen Bodensystematik verwendet (BGS und FAP, 1992), welche, wie schon erwähnt, in ihren Grundzügen von Hans Pallmann in den 40iger Jahren entwickelt worden war. Im hierarchischen Teil des Systems werden vier Klassifikationsstufen unterschieden, die den taxonomischen Bodentyp bestimmen. Ergänzende Merkmale des Profils sowie ökologische Beziehungen eines Bodens zu seiner Umgebung können im nicht-hierarchischen Teil zur besseren Charakterisierung der Böden verwendet werden.

Tabelle 3: Überblick über die hierarchischen Klassifikationsstufen und ihren Kriterien

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Stufe I = Klasse: Wasserhaushalt des Bodens									
perkoliert	selten perkoliert	Nie perkoliert, arid	stauwasser-geprägt	stauwasser-geprägt, extrem austrocknend	grundhangwasser-geprägt	grund- / hangnass, stark verdunstend	peridisch überschwemmt		
Stufe II = Ordnung: Hauptbestandteile des Bodengerüsts									
Gesteinsrelikte	Gesteinsrelikte + organische Substanz	Sekundärminerale + Gesteinsrelikte + organische Substanz	Sekundärminerale + organische Substanz	organische Substanz					
Stufe III = Verband: Kennzeichnende chemische und mineralogische Komponenten des Bodengerüsts									
Silikatgestein	Mischgestein	Karbonatgestein	Tonmineralien + Huminstoffe	Tonmineralien + Eisenoxide	Eisen- + Aluminiumhumate	Eisen + Mangan oxidiert/reduziert	Eisen reduziert	organische Substanz	Eisen- + Aluminiumoxide
Stufe IV = Typ: Kennzeichnende Perkolate									
Aluminiumionen	Kalziumionen	Kalziumbikarbonat	Alkalisalze	Tonverlagerung	Eisen + Mangan reduziert	Kieselsäure	Eisen- + Aluminiumhumate	Na-Tone + -Humate	Huminstoffe

In der obersten Stufe, der Klasse, erfolgt eine Unterteilung auf Grund des vorherrschenden Wasserhaushaltes in acht verschiedene Klassen. Auf der Stufe Ordnung wird die Art der festen Bodensubstanz beurteilt, also der materielle Gerüstaufbau im Boden. Die dritte Stufe, der

Verband, wird durch die chemisch-mineralogischen Komponenten gekennzeichnet. Schliesslich noch die vierte Stufe, der Typ, wird aufgrund der in der Bodenlösung dominant vorkommenden gelösten Stoffen (= Perkolate) gebildet. Die weiteren Stufen fünf bis sieben definieren nicht-hierarchische Merkmale zur Beschreibung des Untertyps, der Bodenform und der Lokalform. Für eine ausführliche Beschreibung der Schweizerischen Klassifikation wird an dieser Stelle auf die Publikation der BGS & FAP (1992) verwiesen.

Aus folgenden zwei Hauptgründen wurde die Schweizerische Bodenklassifikation für diese Arbeit verwendet. Erstens wurden die vorhandenen Bodenprofile des Unterengadins und Münstertals (Boudavary, 1999), welche auch in dieser Arbeit Verwendung finden, nach der Schweizerischen Bodensystematik klassiert. Die Tatsache, dass die verwendeten Bodenprofile aus zwei verschiedenen Projekten stammen, birgt sicherlich eine gewisse Unsicherheit in Bezug auf die Nomenklatur. Eine zusätzliche Übersetzung in ein anderes Klassifikationssystem hätten diese Unsicherheiten noch vergrössert. Der zweite Grund ist die gute Differenzierung der Rohböden in der Schweizerischen Nomenklatur. Während beispielsweise in der deutschen Bodensystematik (Arbeitskreis Bodensystematik, 1998) Rohböden nur nach Syrosemen und Lockersyrosemen unterschieden werden, bietet das Schweizerische System zusätzlich eine Unterscheidung nach dem geologischen Substrat und der Humusaufgabe.

2.3 Bodenentwicklungsreihen und Definition der Bodentypen

Im folgenden Kapitel werden die vereinfachten Bodenentwicklungsreihen auf karbonatischen, silikatischen und gemischt-silikatisch karbonatischen Ausgangsgesteinen aufgezeigt. Zusätzlich wird auch auf die wassergeprägten Böden eingegangen, obwohl diese Böden im Untersuchungsgebiet auf Grund der klimatischen Verhältnisse eine untergeordnete Rolle spielen. Ergänzend zu diesem Kapitel werden in Kapitel 2.4 die wichtigsten Bodenbildungsprozesse beschrieben.

2.3.1 Die Bodenentwicklung auf karbonatischem Ausgangsgestein

Abbildung 3 zeigt die vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf karbonatischem Ausgangsgestein. Mit beginnender physikalischer Verwitterung bildet sich aus dem vegetationslosen Karbonatfels ein Karbonatgesteinboden, auf welchem erste Pionierpflanzen organisches Material anlagern. Sobald eine mehr oder weniger geschlossene Vegetationsdecke vorhanden ist und sich eine durchgehende organische Auflage gebildet hat, spricht man von einem Humus-Karbonatgesteinsboden. Durch die fortschreitende Entkarbonatisierung des Oberbodens und das Aufkommen einer anspruchsvolleren Vegetationsdecke entwickelt sich schliesslich eine Rendzina. Die Weiterentwicklung zur Terra Fusca verläuft sehr langsam, in dem sich die Lösungsrückstände des Ausgangsgesteins im Laufe der Zeit anreichern und allenfalls verbraunen. Die Terra fusca kommt aufgrund ihrer langen Entwicklungszeit im Alpenraum nicht vor, sollte aber Vollständigkeitshalber hier doch erwähnt werden.

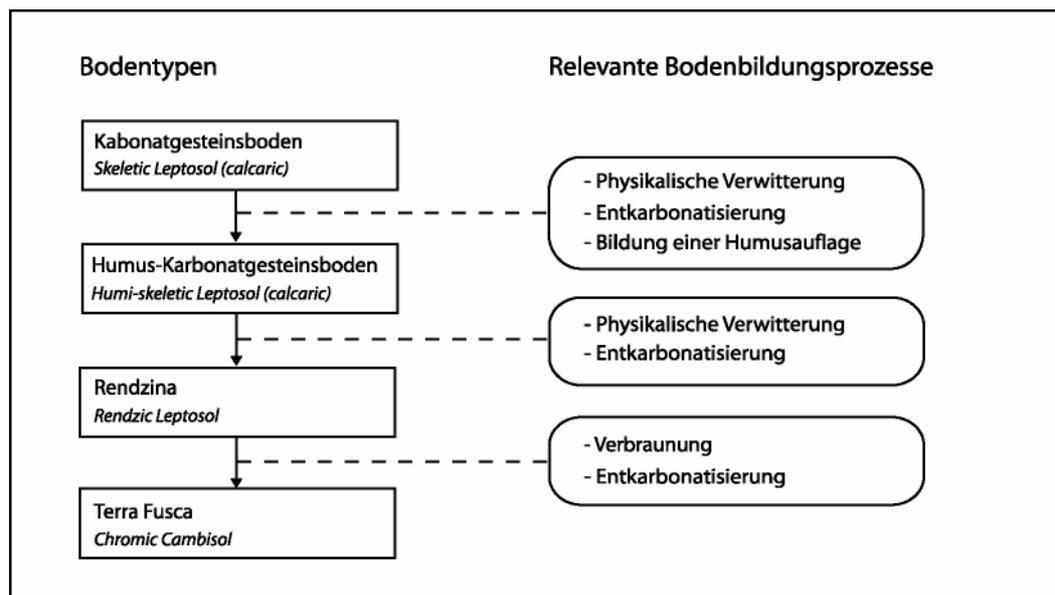


Abbildung 3: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf karbonatischem Ausgangsgestein

In Anlehnung an BGS & FAP (1992) werden nachfolgend die vier Bodentypen definiert.

Karbonatgesteinsboden

Die Karbonatgesteinsböden bilden das Initialstadium der Bodenbildung auf karbonatischem Fels- oder Lockergesteinsmaterial. Sie sind sehr arm an Feinerde (Tonfraktion < 5 %) und weisen keine klar erkennbaren Verwitterungsmerkmale (Verbraunung, pH-Absenkung) auf. Es existieren noch keine durchgehenden Horizonte, aber unter einer sporadisch vorhandenen Pioniervegetation kann sich organisches Material anlagern. Das Bodengerüst besteht im Wesentlichen aus angewittertem Gesteinsschutt. Wenn die Gesteinsschuttauflage eine maximale Mächtigkeit von nur 10 cm erreicht und darunter der anstehende Fels folgt, spricht man von einem Karbonatgesteinslithosol.

Humus-Karbonatgesteinsboden

Im Unterschied zum Karbonatgesteinsboden existiert beim Humus-Karbonatgesteinsboden ein humushaltiger A-Horizont oder zumindest eine organische Auflage, die durchgehend entwickelt ist. Der Gesteinshorizont ist immer feinerdearm, erste Verwitterungsmerkmale (beginnende Entkarbonatisierung) sind jedoch erkennbar. Trotzdem reagieren alle Horizonte noch neutral bis schwach alkalisch. Die organischen Auflagehorizonte können unter Umständen schon eine beträchtliche Mächtigkeit erreichen. Humus-Karbonatgesteinsböden, welche sich im Einflussbereich von Gewässern befinden und alluviale Schichtungen erkennen lassen, werden als Humus-Auenkarbonatgesteinsböden angesprochen.

Rendzina

Die Rendzina ist ein entwickelter Karbonatboden, bei dem eine deutliche Entkarbonatisierung des Oberbodens feststellbar ist. Obwohl oftmals noch Skelettmateriale im Oberboden zu finden ist, kann die Feinerde bereits eine schwach saure oder neutrale Reaktion zeigen. Rendzinen besitzen deutliche Humushorizonte, die typischen Horizontabfolgen sind (O)-Ah-AC-C oder O-Ah-(B)C-C. Bei einem erhöhten Tongehalt können somit erste Anzeichen einer Verbraunung vorhanden sein. Die Hauptunterschiede zum Humus-Karbonatgesteinsboden bestehen im Wesentlichen aus der grösseren Mächtigkeit, sowie in der fortgeschrittenen Entkarbonatisierung der Oberbodenhorizonte. Bei regelmässiger Austrocknung des Profils infolge einer stark negativen Wasserbilanz spricht man von einer Trockenrendzina. Der Name Rendzina

hat seinen Ursprung in Polen und beschreibt das Rauschen der vielen Steine am Streichblech des Pfluges (Scheffer et al., 2002).

Terra Fusca

Die Terra Fusca bildet das Klimaxstadium auf karbonatischem Ausgangsmaterial. Sie entsteht aus einer Rendzina, wenn die silikatischen, tonreichen Lösungsrückstände (Residualprodukte) der Kalk-, Dolomit- oder Gipsgesteine eine solche Mächtigkeit erreicht haben, dass die Bodenorganismen diese nicht mehr vollständig mit dem Humuskörper vermischen können. Es bildet sich durch die Anlagerung der Residualprodukte ein saurer Horizont, der ockerbraun gefärbt ist. Die Oxidierung von freigesetztem Eisen führt oftmals zu einer zusätzlichen Verbraunung. Die Entwicklung zur Terra Fusca läuft sehr langsam ab, da die Lösungsrückstände im Ausgangsgestein oft nur wenige Gewichtsprozent ausmachen. Wenn durch eine zusätzliche Hämatitbildung (Rubefizierung) die Horizonte rötlich gefärbt sind, spricht man von einer Terra rossa. Diese Böden sind meist mässig bis stark sauer, reich an Ton und dicht gelagert. Sie treten in Mitteleuropa nur vereinzelt auf erosionsfernen, vornehmlich alten Landoberflächen mesozoischer Karbonatgesteinen auf (Scheffer et al., 2002).

2.3.2 Die Bodenentwicklung auf silikatischem Ausgangsgestein

Analog zur karbonatischen Bodenentwicklungsserie entsteht zuerst ein Silikatgesteinsboden, der sich nach Bildung einer Humusauflage zu einem Humus-Silikatgesteinsboden weiterentwickelt. Der Übergang zu einem Ranker zeigt sich in der Bildung von Sekundärmineralien, meist in Form einer Oxidierung, welche zu einer schwachen, undifferenzierten Verbraunung führt. Bei anhaltender Verbraunung und Versauerung entsteht aus dem Ranker eine saure Braunerde. Wenn die Podsolierung gegenüber der Verbraunung dominant ist, entsteht entsprechend ein Podsol. In der Bodenentwicklungsreihe von Abbildung 4 kommt die Podsolierung nicht mit der Verbraunung vor. In der Realität verlaufen diese Prozesse oftmals parallel ab, wobei jedoch ein Prozess, je nach Konstellation der bodenbildenden Faktoren, überwiegt. Eine morphologische Unterscheidung zwischen Podsolen und Braunerden ist nicht immer einfach. Bei Braunpodsolen beispielsweise lässt sich die Podsolierung nur analytisch in der Feinerde nachweisen.

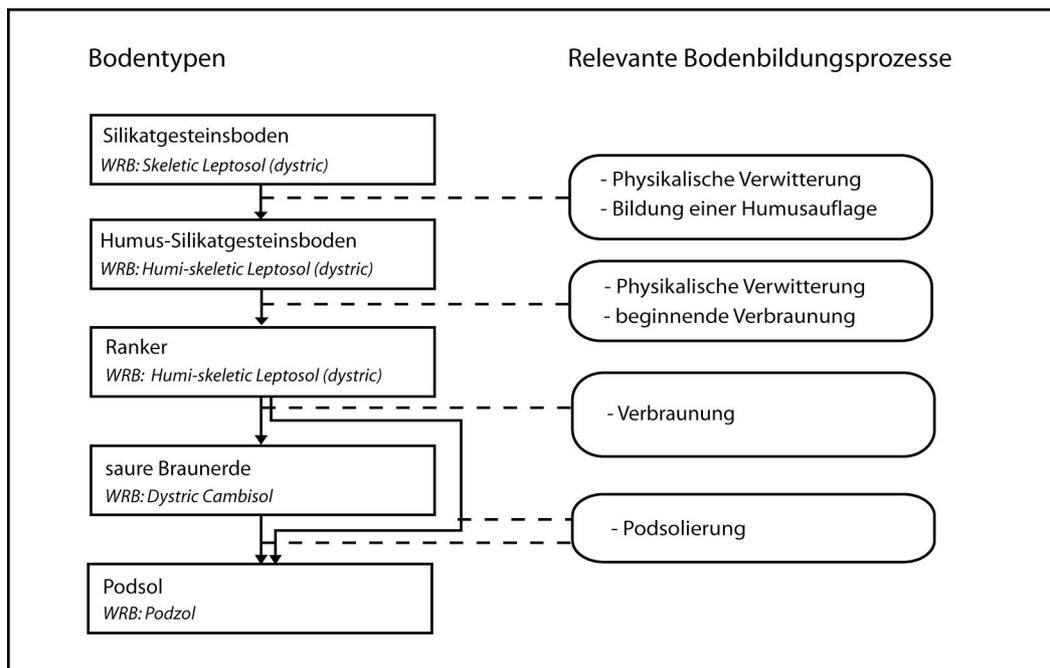


Abbildung 4: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf silikatischem Ausgangsgestein

In Anlehnung an BGS & FAP (1992) werden nachfolgend die fünf Bodentypen definiert.

Silikatgesteinsboden

Der Silikatgesteinsboden stellt das Initialstadium der Bodenbildung auf silikatischem Ausgangsgestein dar. Er besitzt eine O-C Horizontabfolge, wobei diese nicht durchgehend vorhanden ist. Eine meist dünne organische Auflage liegt direkt auf Fest- oder skelettreichen Lockergesteinen. Bei Festgestein spricht man von einem Silikatlithosol. Eine pH-Veränderung im Profil ist kaum vorhanden und der Tongehalt liegt unter 5 %.

Humus-Silikatgesteinsboden

Im Gegensatz zum Silikatgesteinsboden finden sich beim Humus-Silikatgesteinsboden erste Anzeichen von chemischer Verwitterung, Sekundärminerale haben sich aber noch nicht gebildet. Er ist durchwegs flachgründig und sehr skelettreich. Es existiert ein durchgehender Ah- oder Auflagehorizont, dessen pH-Werte leicht abgesenkt sind. Die organische Auflage kann unter Umständen sehr mächtig (bis 40 cm) werden.

Ranker

Der Ranker ist ein Silikatboden mit Sekundärmineralien. Die Horizontabfolge ist O-A_h-BC-C. Unter der Humusauflage folgt ein humoser Oberbodenhorizont, darunter liegt oft ein leicht verbraunter BC-Horizont, der eine beginnende Oxidfreisetzung (Verbraunung) erkennen lässt. Alles in allem erscheint das Profil aber gleichmässig, da die Horizonte noch nicht stark differenziert sind. Im Oberboden ist eine deutliche Versauerung nachweisbar. Der Ranker geht durch fortschreitende Humusakkumulation und Verwitterung aus den Silikatrohböden hervor (Scheffer et al., 2002).

Saure Braunerde

Die saure Braunerde entsteht vorwiegend auf Silikatgestein. Die typische Horizontabfolge ist A_h-B_w-C oder A_h-B_{fe}-C. Der B-Horizont zeigt eine deutliche Verwitterung mit Sekundärmineralien (Tonen, Oxiden) und ist meist intensiv rostrot gefärbt. Der pH-Wert bewegt sich im

sauren bis stark sauren Bereich (pH 3 – 5). Die saure Braunerde entsteht in gemässigt-humidem Klima aus dem Ranker, sobald die Verbraunung jene tieferen Teile des Profils erfasst, in denen kein Humus angereichert worden ist (Scheffer et al., 2002).

Podsol

Grundsätzlich kann zwischen Braun-, Eisen-, und Humuspodsolen unterschieden werden. Bei Braunpodsolen entstehen unter stark sauren Verhältnissen und einer modrigumosen Auflage Eisen- und Aluminium-Humate, die aber kaum wanderungsfähig sind. Der Eisenpodsol ist durch einen deutlich ausgebleichten Auswaschungs- (E) und darunter durch einen rostbraun gefärbten Anreicherungshorizont (Bfe) gekennzeichnet. Die Fe- und Al-Oxide werden dabei durch metallorganische Komplexe in den Unterboden verlagert. Der E-Horizont weist meist ein loses Einzelkorngefüge auf, während der Anreicherungshorizont oft etwas verkittet ist. Die Verkittung kann dabei bis zur Bildung von kompaktem Ortstein gehen (Bach, 1966). Beim Humuspodsol folgt unter dem E-Horizont ein huminstoffreicher schwarzer Horizont, der den Bfe-Horizont überlagern kann. Der Humuspodsol unterscheidet sich vom Eisenpodsol durch eine stärkere Humus- resp. schwächere Sesquioxidverlagerung (Bach, 1966). Podsole entstehen im Alpenraum vorwiegend unter Nadelholzvegetation oder Zwergstrauchheiden. Der Name Podsol leitet sich aus einem russischen Bauernnamen ab, der soviel wie „Asche-Boden“ bedeutet, womit der bleiche Auswaschungshorizont gemeint ist (Scheffer et al., 2002).

2.3.3 Die Bodenentwicklung auf gemischtem Ausgangsgestein

Wenn der Gehalt an karbonatischen Gesteinen zwischen ca. 2 und 75 % liegt, wird von gemischt karbonatisch-silikatischen Ausgangsgesteinen gesprochen. Dabei hat das Mischverhältnis einen entscheidenden Einfluss auf die Art und Geschwindigkeit der Bodenentwicklung.

Vor oder während der Entstehung eines Mischgesteinsbodens dominieren oft geomorphologische Prozesse, wie zum Beispiel Ablagerungen durch Gletscher oder Fließgewässer. Diese vermischen die silikatischen und karbonatischen Gesteinsfragmente miteinander. Folglich entstehen diese, im Unterschied zu den karbonatischen und silikatischen Böden, ausschliesslich auf Lockergesteinsmaterial. Nach einer Stabilisierung der geomorphologischen Verhältnisse, kann sich eine Vegetationsdecke bilden, unter welcher sich ein Humus-Mischgesteinboden entwickelt. Aus diesem bildet sich im Laufe der Zeit ein Regosol, bei dem sich eine beginnende Verbraunung beobachten lässt. Mit fortschreitender Entkarbonatisierung und Verbraunung entsteht schliesslich eine neutrale Braunerde. Mit zunehmendem Alter und fortschreitender Versauerung kann sich daraus eine saure Braunerde entwickeln. Bei zusätzlichen Tonverlagerungsprozessen verläuft die Entwicklung in Richtung einer Parabraunerde.

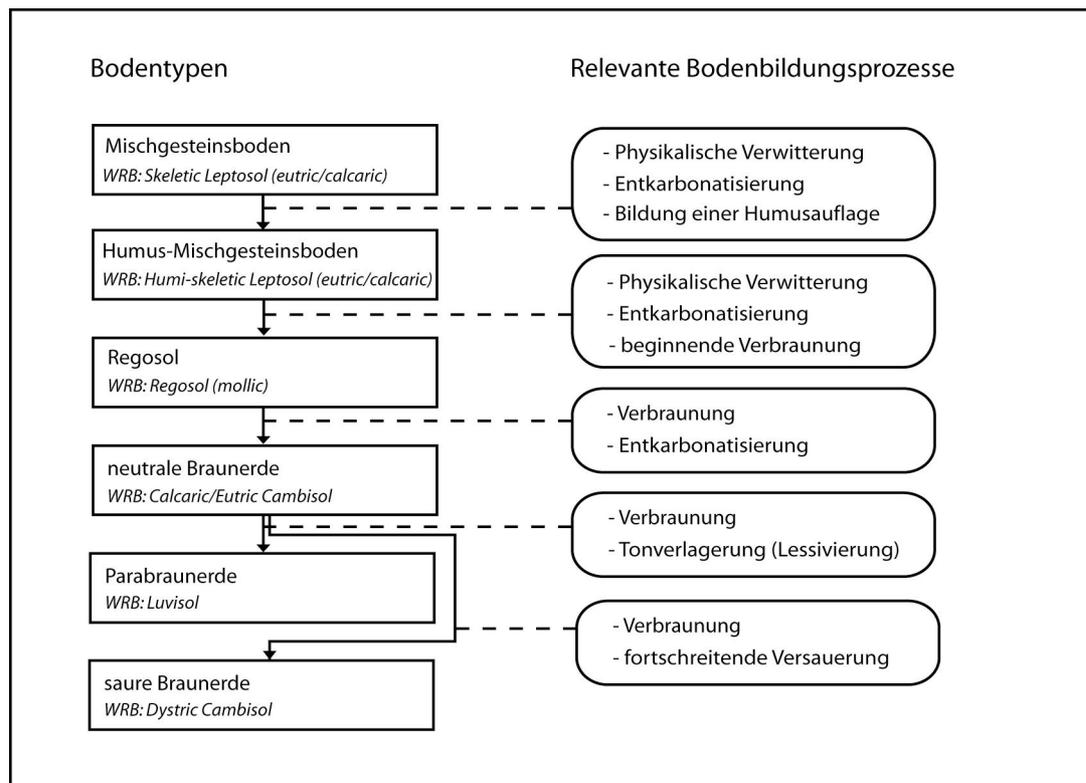


Abbildung 5: Vereinfachte Bodenentwicklungsreihe auf gemischt silikatisch-karbonatischem Ausgangsgestein

In Anlehnung an BGS & FAP (1992) werden nachfolgend die vier Bodentypen definiert. Auf die Definition der Parabraunerde wird verzichtet, da sie im Untersuchungsgebiet so gut wie nicht vorkommt.

Mischgesteinsboden

Der Mischgesteinsboden bildet das Pendant zu den Karbonat- und Silikatgesteinsböden. Er stellt den Rohboden auf gemischt silikatisch-karbonatischem Lockergestein dar, wobei der Karbonatanteil bei Böden mit gemischtem Ausgangsmaterial zwischen 5 und 75 % beträgt. Er besitzt keine durchgehenden Horizonte und die Pioniervegetation ist nur sehr lückenhaft vorhanden. Zudem sind noch keine Verwitterungsmerkmale erkennbar, der Tongehalt beträgt weniger als 5 %.

Humus-Mischgesteinsboden

Beim Humus-Mischgesteinsboden kennzeichnet ein ununterbrochener Ah- oder Auflagehorizont das Profil, da eine mehr oder weniger geschlossene Vegetation vorhanden ist. Die Entkarbonatisierung ist nachweisbar, sämtliche Mineralerdehorizonte reagieren deswegen schwach alkalisch bis neutral. Sekundäre Minerale (Oxide) sind jedoch noch nicht manifest, und der Tonanteil der Feinerde beträgt ebenfalls weniger als 5 %.

Regosol

Der Regosol ist ein Mischgesteins-Sekundärmineralboden, mit deutlichen Humushorizonten und einem Tonanteil von über 5 %. Er bildet das Übergangsstadium von den Rohböden zu den entwickelten Braunerden. Der Oberboden kann vollständig entkarbonatisiert sein und somit schwach sauer reagieren. Er weist einen AC Horizont, bei einer Verbraunung einen BC Horizont auf. Regosole besitzen ein aggregiertes Bodengefüge, die Mineralerdehorizonte sind jedoch im Allgemeinen nur schwach horizontiert. Im Unterschied zur Schweizerischen Klas-

sifikation werden in der Deutschen Bodensystematik Regosole als Böden bezeichnet, die aus kalkfreiem oder kalkarmem Lockergesteinsmaterial entstehen.

Neutrale Braunerde

Die neutrale Braunerde entsteht vorwiegend aus Regosolen, indem sich unter dem Ah-Horizont ein B-Horizont ausbildet, der vollständig entkalkt ist, aber immer noch neutral bis schwach sauer reagiert. Die Braunfärbung ist oft nicht sehr intensiv, was zu relativ diffusen Horizontgrenzen führt. Die typische Horizontabfolge ist Ah-AB-Bw-C.

2.3.4 Die Bodenentwicklung von wassergeprägten Böden

Bei den wassergeprägten Böden kann man nicht, wie bei den terrestrischen Böden, von einer genetischen Bodenentwicklungsreihe ausgehen, da der Wasserhaushalt als prägender Bodenbildungsfaktor die Nomenklatur charakterisiert. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Gleyen, organischen Nassböden und Pseudogleyen. Gleye werden von Hang- oder Grundwasser beeinflusst, wobei die vom Grundwasser unbeeinflussten Horizonte eine, je nach Ausgangsgestein, terrestrische Bodenentwicklung durchmachen können. Der Übergang von Gleyen zu organischen Nassböden ist fließend, da sich bei andauernd hohem Grundwasserstand über den Gleyhorizonten eine Torfschicht bilden kann. Ab einer Torfmächtigkeit von mindestens 40 cm spricht man von einem flachtorfigen Moor.

Bei Pseudogleyen bestimmt, im Gegensatz zu grundwassergeprägten Gleyen, eine Stauschicht die Bodenbildung, was zu Rostfleckigkeit infolge des Wechsels von Stauwasser und Austrocknung führt. Da ausgeprägte Pseudogleye im Untersuchungsgebiet nicht beobachtet werden konnten, werden diese Böden im Folgenden auch nicht näher definiert.

Gleye

Gleye sind Böden, die durch den Einfluss von Grund- oder Hangwasser geprägt werden. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Fahlgley, Buntgley und Braunerde-Gley. Fahlgleye sind stark hydromorph, da ein grosser Teil des Profils dauernd vernässt und somit reduziert ist. In den reduzierten Horizonten entstehen keine Rostflecken, jene Horizonte werden durch eine charakteristische Fahlfärbung gekennzeichnet. Fahlgleye treten häufig mit anmoorigen Humusformen auf. Bei Buntgleyen variiert der Grundwasserspiegel stark, was zu einem Wechsel von reduzierenden und oxidierenden Verhältnissen im Profil führt. In Phasen geringer Wassersättigung bilden sich an den Bodenhohlräumen Eisenoxidflecken und Konkretionen, während die Bodenmatrix vorwiegend fahlgrau (reduziert) bleibt. Bei Braunerde-Gleyen nimmt die Marmorierung (Eisenoxidierung) mit der Tiefe zu. Der obere braunerdeartige Teil des Profils ist zudem oft entkarbonatisiert.

Organische Nassböden (Moore, Halbmoore)

Man unterscheidet zwischen Halbmooren und Mooren. Diese entstehen, wenn der Grundwasserstand auch während der Vegetationsperiode nahe der Oberfläche liegt und dadurch der Abbau der organischen Substanz aufgrund von Sauerstoffmangel stark gehemmt ist. Die organische Auflage reichert sich somit in grossen Mengen als Torf an der Oberfläche an. Halbmoore entstehen meist in der Nähe von Gewässern, die bei Hochwasser mineralisches Material einschwemmen. Die Torfbildung ist daher durch Sedimentschichten unterbrochen. Bei Mooren existieren keine solchen mineralischen Zwischenschichten. Oft findet man Moore auf grösseren Ebenen, flachen Hängen mit undurchlässigem Untergrund oder abflusslosen Senken. Wenn die Torfmächtigkeit über bzw. unter 90 cm beträgt, spricht man von tieftorfigen bzw. flachtorfigen Mooren und Halbmooren.

Aueböden

Auf Fluss- und Seesedimenten mit beginnender oder deutlicher Bodenbildung und periodischen Überschwemmungen entwickeln sich Aueböden. Sie zeigen eine alluviale Schichtung. Dabei können mehrere überdeckte Ah-Horizonte vorhanden sein, die durch relativ frische Alluvionen unterbrochen werden. Die Körnung kann sehr stark variieren, abhängig von der Stärke der Überschwemmung. Der Grundwasserstand bei Aueböden hängt stark vom Niveau des Gewässers ab. Im internationalen WRB-System werden die Aueböden als Fluvisole angesprochen. Mit zunehmender Bodenentwicklung und somit abnehmender Überschwemmungsperiodizität wird eine klare Unterscheidung zwischen Aueböden und perkolierten Böden im Allgemeinen schwieriger, da die alluviale Schichtung durch Bodenbildungsprozesse (Verwitterung, Bioturbation) verwischt wird.

In dieser Arbeit war es aufgrund der Grundlagedaten nur möglich die Auengesteinsböden zu modellieren. Diese fluvial geprägten, unentwickelten Böden weisen keine Verwitterungsmerkmale auf. Charakteristisch ist zudem eine schichtige, frische Überschüttung, die einen lückenlosen Pflanzenbewuchs verhindert. Das Grundwasser bei Auengesteinsböden befindet sich meist in geringer Tiefe.

2.4 Relevante Bodenbildungsprozesse

Im Folgenden werden die für das Untersuchungsgebiet wichtigsten, profilprägenden Prozesse beschrieben, welche in ihrer Gesamtheit die Entwicklung eines Bodens ausmachen. Auf die Pseudovergleyung und die Tonverlagerung wird nicht näher eingegangen, da diese Prozesse eine nur stark untergeordnete Rolle bei der Bodenentwicklung im Untersuchungsgebiet spielen. Neue Horizonte und Veränderungen entstehen zum einen durch Umwandlungsprozesse (Transformationen), zum anderen durch Verlagerungsprozesse (Translokationen). Die Intensität und Art der ablaufenden Bodenbildungsprozesse wird durch die Bodenbildungsfaktoren (siehe Kap. 2.1) bestimmt (Scheffer et al., 2002).

Physikalische Verwitterung (mechanische Sprengungsprozesse)

Die physikalische Verwitterung bewirkt eine mechanische Zerkleinerung der Gesteine und folglich eine starke Oberflächenvergrößerung. Darunter fallen diverse Sprengungsprozesse, denen vor allem in Hochgebirgen eine dominierende Rolle zukommt.

Die Frostsprengung wirkt durch Gefrieren und Auftauen von Wasser im Kluftsystem der Gesteine. Sie ist bei häufigem Frostwechsel besonders wirksam. Die Insolationsverwitterung basiert auf Temperaturschwankungen. Die hellen und dunklen Minerale dehnen sich abhängig von ihren spezifischen Ausdehnungskoeffizienten und der Strahlungsabsorption im Tagesverlauf unterschiedlich stark aus. Die resultierenden Spannungen zwischen Gesteinsoberfläche und Gesteinsinnerem lockern das Gesteinsgefüge. Schliesslich die Wurzelsprengung, die erfolgt, wenn Pflanzenwurzeln in Gesteinsklüfte vordringen und diese durch ihr Wachstum erweitern (Hintermaier, 1997).

Entkarbonatisierung (Hydrolyse von Karbonatgestein)

Die Entkarbonatisierung ist die chemische Auflösung und anschliessende Auswaschung der karbonatischen Gesteine eines Bodens. Karbonatgesteine (Calcit und Dolomit) bewirken im Boden einen schwach basischen pH-Wert. Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmung von Organismen und aus der Atmosphäre reagiert mit Wasser (H₂O) zu Kohlensäure, welches Calcit oder Dolomit aufzulösen vermag:



Produkt dieser Reaktion sind gelöste Ca-Ionen sowie das schwach basisch reagierende Bikarbonat. Die Entkarbonatisierung kann verstärkt werden, indem der CO_2 -Partialdruck in der Bodenluft erhöht wird, oder indem die Endprodukte [Ca^{2+} und $(\text{HCO}_3)_2$] mit dem Sickerwasser weggeführt werden. Sobald die Feinerde einmal entkarbonatisiert ist, sinkt der pH Wert in den schwach sauren Bereich und gibt der weiteren Mineralverwitterung den Weg frei. Karbonate enthalten immer Verunreinigungen (Oxide, Quarzanteile oder Tonpartikel), welche als Rückstände, so genannte Residualprodukte, im Boden liegen bleiben und sich so passiv anreichern (Fitze et al., 1996). Die Prozessgeschwindigkeit ist abhängig von der Morphologie (Klüftung, Bankung) und vom Chemismus (Ca/Mg Verhältnis, Anteil anderer Mineralien). So verläuft die Verwitterung von Dolomit [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] im Vergleich zu Calcit eher langsamer. Im Unterboden kann schliesslich die Karbonatisierung (Umkehr der Entkarbonatisierung) eintreten, da beispielsweise die biologische Aktivität und damit der CO_2 -Partialdruck der Bodenluft geringer wird oder Wasser durch Evapotranspiration verbraucht wird.

Bodendurchmischung (Turbationen)

Die Bodendurchmischung ist ein Vorgang, dem verschiedene andere Prozesse zugrunde liegen. Es sind Vorgänge, bei denen Bodenmaterial eines oder auch verschiedener Bodenhorizonte vermischt werden und sich dabei die Grenzen der Horizonte oder Gesteinsschichten verwischen. Bei der Bioturbation zerkleinern Bodentiere die Streuauflage und vermischen diese mit dem oberen Mineralboden, was zur Ausbildung eines A-Horizontes führt. Im vorwiegend periglazialen Bereich, also in Gebieten mit starker Frosteinwirkung führt das Aufrieren und Aufpressen (Kryoturbation) ebenfalls zu Mischungsvorgängen. Schliesslich kann auch der Mensch durch Bodenbearbeitung (Pflügen) für eine Durchmischung des Bodens sorgen.

Verbraunung

Die Verbraunung ist die Verwitterung von eisenhaltigen Mineralien unter Bildung von Sekundärmineralien (Oxiden, Hydroxiden), die dem Boden eine rötlichbraune oder rostige Farbe verleiht. Dieser Prozess findet grundsätzlich erst nach der Entkarbonatisierung, im Silikatpufferbereich statt. Voraussetzung dafür ist ein pH-Wert zwischen 6.5 und 3. Die Verbraunung ist oft mit der Bildung von Tonmineralien verknüpft, was als Verlehmung bezeichnet wird. Beide Prozesse, Verbraunung und Verlehmung sind charakteristisch für den B-Horizont einer Braunerde (Fitze et al., 1996).

Podsolierung

Die Podsolierung ist die abwärts gerichtete Umlagerung gelöster organischer Stoffe, oft in Zusammenhang mit Aluminium und Eisen. Die Verlagerung findet bei stark saurer Reaktion statt, da der Nährstoffmangel und oft auch das kühlfeuchte Klima den mikrobiellen Abbau der organischen Komplexbildner hemmt (Scheffer et al., 2002). In tieferen Schichten verursacht der pH-Anstieg schliesslich eine Ausfällung der Komplexverbindungen. Dabei reichern sich zuerst die organischen Stoffe an, in den darunter liegenden Schichten die Fe- und Al- Oxide (Sammel, 1993). Im Oberboden entsteht somit ein Horizont von ausgebleichter Farbe und im Unterboden ein meist intensiv rostbrauner (hervorgerufen durch Eisen) oder grauschwarzer (Humus) Horizont. Podsole entstehen überwiegend im alpinen Raum unter Nadelwald- und Zwergstrauchvegetation auf silikatischen Gesteinen.

Vergleyung

Die Vergleyung findet im Einflussbereich von Grund- und Hangwasser statt. Dabei befindet sich über einem dauernd mit Wasser gesättigten Bereich eine Zone, in der sich die Kapillar-

wirkung des Grundwassers bemerkbar macht. Zusammen mit den natürlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels ist dieser obere Bereich häufig von durchlüfteten, also oxidierten Verhältnissen geprägt. Nach Luftzufuhr bei sinkendem Grundwasser werden die groben Poren zuerst durch die Oxidation erfasst, es entstehen somit an den Rändern der Poren rostig gefärbte Stellen (Gleyfleckigkeit). Gleye bilden sich häufig in Mulden und Senken, in denen das Grundwasser das Bodenprofil beeinflussen kann (Fitze et al., 1996).

2.5 Die Fuzzy-Set Theorie

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Fuzzy Theorie. Es sollen die Grundbegriffe und der Bezug zur allgemeinen Mathematik hergestellt werden und diese in einfacher Weise vermittelt werden. Dabei sollen nur jene Grundlagen angesprochen werden, die für diese Arbeit von Relevanz sind. Für eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Fuzzy Theorie sei auf die folgende Literatur verwiesen: Bothe (1993), Traeger (1993) und Böhme (1993).

2.5.1 Unscharfe Mathematik

Die verfügbaren mathematischen Ansätze der Boole'schen Algebra, sind zur Beschreibung von „unscharfer“ Information oft nicht ausreichend. Gerade in der Natur gibt es keine bivalenten Entscheidungen, „wahr“ oder „nicht-wahr“ mit scharfen Grenzen, sondern die naturräumlichen Verhältnisse verlangen oft nach einer abgestuften, kontinuierlichen Beschreibung, also nach Übergangsbereichen (Stolz, 1998). Die unscharfe Mathematik stellt eine Erweiterung der klassischen Mathematik dar. Sie ist nicht schwammig oder ungenau, sondern basiert auf logischen Regeln wie die gewohnte Mathematik, die in ihr enthalten ist, was bedeutet, dass jeder „scharfe“ präzise Wert eine Sonderform des allgemeinen „unscharfen“ Falles ist (Traeger, 1993). Unschärfe soll dabei eine graduierte Bewertung des Wahrheitsgehaltes bedeuten. Die unscharfe Mathematik ist keine Verschlechterung oder Vergrößerung der klassischen Mathematik, sondern eine Erweiterung. Sie ermöglicht es grundsätzlich, menschliche Erfahrung und linguistische Begriffe mathematisch in den Griff zu bekommen.

2.5.2 Unscharfe Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen

Eine unscharfe Menge (engl: fuzzy set) ist die Erweiterung einer „klassischen“ Menge der Bool'schen Algebra. Bezeichnet wird eine unscharfe Menge durch eine so genannte linguistische Variable, einem umgangssprachlichen Begriff wie zum Beispiel „hoch“, „schnell“ oder „teuer“. Die Definition einer unscharfen Menge M erfolgt mit Hilfe einer charakteristischen Funktion $\mu_M(x)$, die als Zugehörigkeitsfunktion (engl: membership function) bezeichnet wird. Die entsprechenden Zugehörigkeitsgrade μ werden auch als Möglichkeiten (possibilities) bezeichnet, im Unterschied zu den statistisch evaluierten Wahrscheinlichkeiten (probabilities). Die Werte von $\mu(x)$ liegen im normalisierten Fall zwischen 0 (keine Zugehörigkeit) und 1 (volle Zugehörigkeit). Damit können im Gegensatz zur klassischen Mengenlehre auch „fließende“ Übergänge der Elementzugehörigkeit zu einer Menge beschrieben werden (Bothe, 1993).

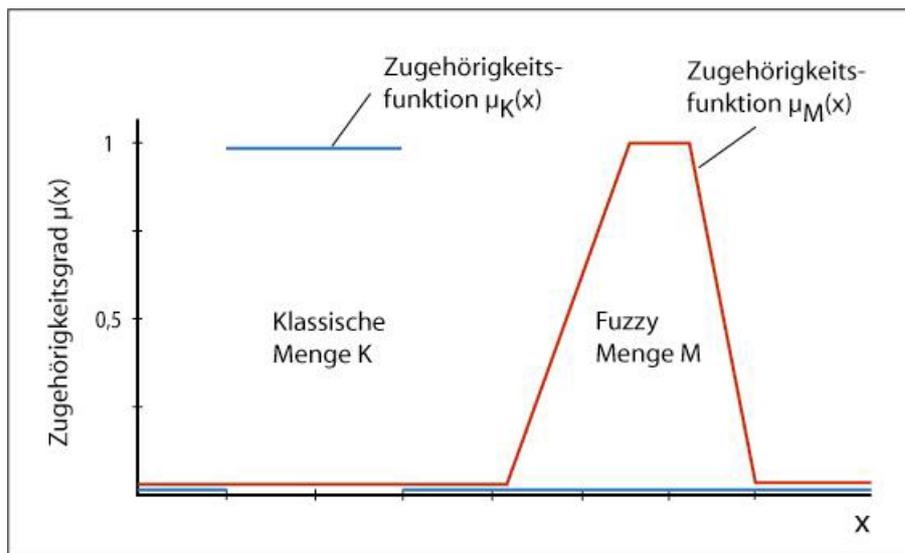


Abbildung 6: Unterschied zwischen einer klassischen und einer Fuzzy Menge

Abbildung 6 verdeutlicht den Unterschied zwischen einer scharfen, klassischen Menge und einer Fuzzy Menge. Dabei sei X die Gesamtheit aller Objekte und x ein Element davon. Eine Fuzzy Menge M aus der Gesamtheit X ist im Beispiel charakterisiert durch die Funktion $\mu_M(x)$, die jedem Punkt in X einen realen Wert aus dem Intervall $[0,1]$ zuordnet. Der Wert von $\mu_M(x)$ an der Stelle x repräsentiert den Zugehörigkeitsgrad (grade of membership), den x in der Fuzzy Menge M annimmt. Im Gegensatz wird die klassische Menge K durch eine charakteristische Funktion $\mu_K(x)$ beschrieben, die nur zwei Werte annehmen kann. Die Werte $\mu_K(x)$ werden gleich 1 gesetzt, falls $x \in K$, bzw. gleich 0 gesetzt, falls $x \notin K$. Entweder ist ein Wert x Mitglied von K oder nicht. Eine andere Möglichkeit existiert bei klassischen Mengen nicht.

2.5.3 Mengenalgebraische Operationen zur Verknüpfung von unscharfen Mengen.

Da die unscharfe Mengenlehre die scharfe, klassische Mengenlehre enthält, müssen Mengenoperationen und –verknüpfungen generell möglich sein. In der unscharfen Logik stehen für ein und denselben Sachverhalt mehrere verschiedene Operatoren zur Auswahl. Welcher Operator letztendlich für eine Problemlösung herangezogen wird, hängt unter anderem von Rechenleistung, praktischer Erfahrung, problemspezifischen Anforderungen und schliesslich von Gefühl und Intuition des Auswählenden ab (Traeger, 1993). Im Folgenden sollen nur die beiden Verknüpfungen UND und ODER angesprochen werden, da sie in dieser Arbeit verwendet werden.

Für die UND-Verknüpfung stehen mehrere Operatoren zur Verfügung. Die beiden wichtigsten sind:

- $\mu_{A \text{ UND } B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\},$

wobei A und B unscharfe Klassen darstellen.

Die UND-Verknüpfung über einen Minimum Operator. Dabei wird der Minimalzugehörigkeitswert mehrerer Mengen ermittelt. Da dieser ein einfach zu berechnender Operator ist und generell am häufigsten verwendet wird, wurde er auch in dieser Arbeit verwendet.

- $\mu_{A \text{ UND } B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$

Die Verwendung eines Produkt-Operators. Dabei wird das Produkt beider Zugehörigkeitswerte berechnet.

Analog zur UND stehen auch bei der ODER Verknüpfung mehrere Operatoren zur Verfügung:

- $\mu_{A \text{ ODER } B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$

Die ODER-Verknüpfung über einen Maximum Operator. Dieser wurde im Modell verwendet.

- $\mu_{A \text{ ODER } B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$

Die ODER Verknüpfung ergibt sich als Differenz aus der Summe mit dem Produkt der Zugehörigkeitsgrade.

2.5.4 Abgrenzung zur Wahrscheinlichkeitstheorie

Man muss sich bewusst sein, dass es sich bei den Zugehörigkeitsgraden nicht um Wahrscheinlichkeiten handelt. Eine Wahrscheinlichkeit sagt aus, wie wahrscheinlich ein gewisses Ereignis eintritt, aber eben nichts über dessen tatsächlichen Zustand. Der Zugehörigkeitsgrad ist aber eine reale Eigenschaft eines betrachteten Elementes, welches diese Eigenschaft auch besitzt. Ein Zugehörigkeitsgrad von $\mu_M(x) = 0,7$ sagt aus, dass das Element x zu 70 % tatsächlich zur Fuzzy Menge M gehört. Er sagt hingegen nicht aus, dass x mit einer Wahrscheinlichkeit von 70 % zur Menge M gehören könnte (Traeger, 1993).

3 Methoden und Daten

3.1 Bodenkundliche Datenerhebung

3.1.1 Feldarbeit

Die Feldarbeit wurde in zwei Perioden im Sommer und Frühherbst 2004 absolviert und hatte zum Ziel, die geringe Anzahl Bodenprofile aus dem Nationalpark zu erweitern, um somit unter anderem eine Grundlage für die Modellierung zu schaffen. In der ersten Feldarbeitsperiode im Sommer konnte ich auf die Unterstützung eines Mitarbeiters der WSL zählen. Dies war äusserst hilfreich, da sämtliches Material und die Proben in Rucksäcken mitgetragen werden mussten. Es wurde in allen begehbaren Gebieten des Nationalparks Feldarbeit geleistet, einerseits um die Profile möglichst gut über den Park zu verteilen, andererseits um die einzelnen Parkregionen bodenkundlich kennen zu lernen und dabei die GIS-Datensätze auf ihre Brauchbarkeit hin zu überprüfen.

Für diese Arbeit wurden im Gesamten 89 Bodenprofile verwendet, davon wurden 63 während der Feldarbeit 2004 aufgenommen (rote Standorte in Abbildung 7). Die restlichen 26 wurden in den Jahren 1998 und 1999 im Rahmen eines WSL-Praktikums (Budavàry, 1999) angesprochen. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Waldbodenstandort, welche sich vorwiegend im Val Trupchun und im Unterengadin befinden (blaue Standorte in Abbildung 7).

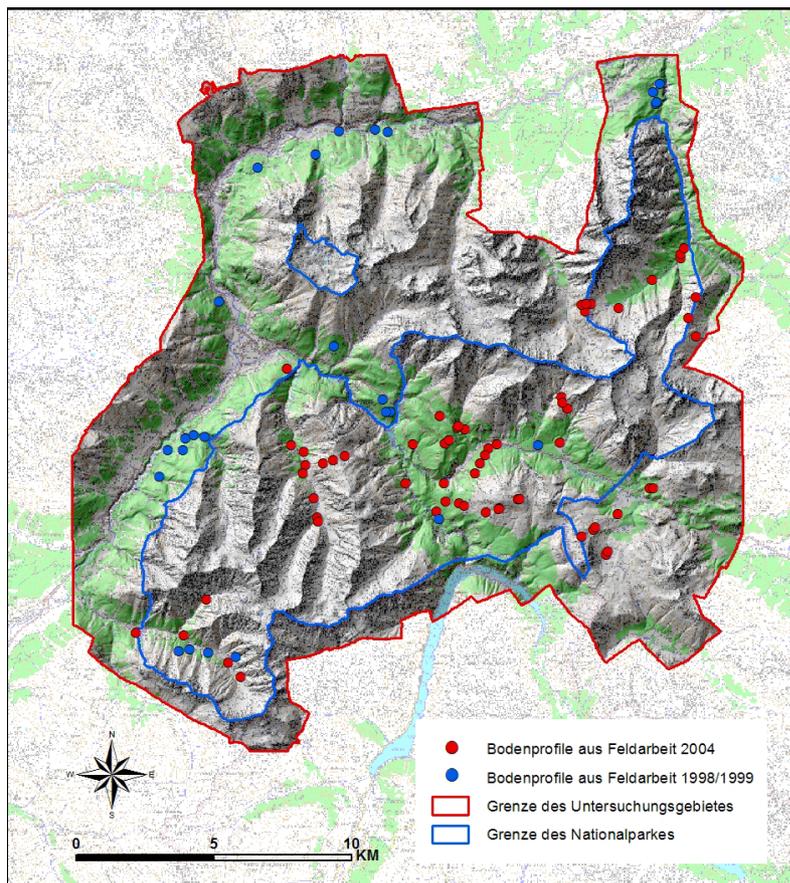


Abbildung 7: Übersicht über die 89 Bodenprofilstandorte (LK 100'000 © Swisstopo, BA067781)

3.1.1.1 Wahl des Profilstandortes

Da das Graben von Profilen mit Lärm verbunden war und somit zu Störungen der Fauna führen konnte, wurde von der Forschungskommission des Nationalparks gefordert, dass die Profilgruben in einem 40 Meter breiten Korridor entlang der Wanderwege gegraben werden sollten. Bezüglich der Wahl des Standortes bedeutete dieser Umstand natürlich eine Einschränkung, die aber unter den speziellen Umständen in einem Schutzgebiet verständlich waren. Die Auswahl der Standorte erfolgte hauptsächlich anhand der geologischen Karte (Dössegger, 1987), der Vegetationskarte (Zoller, 1992) und der digitalen geomorphologischen Karte. Zusätzlich spielten auch Relieffaktoren wie beispielsweise Höhenlage und Neigung bei der Wahl eine wichtige Rolle. Dabei wurde darauf geachtet, auf möglichst vielen verschiedenen thematischen Kartierungseinheiten ein Profil graben zu können. Die genaue Standortwahl erfolgte im Gelände, wobei eine Stelle gewählt wurde, die bezüglich des Reliefs (Neigung und Geländedeform) möglichst repräsentativ für die nähere Umgebung sein sollte. Auf diese Weise sollte der Einfluss des Mikroreliefs minimiert werden. Die Wahl des Standortes war oft nicht einfach, da man einerseits innerhalb des 40 Meter breiten Korridors bleiben musste, andererseits das Relief innerhalb weniger Meter stark ändern konnte.

3.1.1.2 Vorgehen am Profilstandort

Aufgrund der skelettreichen Böden war der Einsatz eines Bohrstockes (Prückhauer) nicht möglich, folglich musste für die Ansprache immer eine Profilgrube gegraben werden. Wegen der speziellen Situation im Nationalpark wurde darauf geachtet, dass, wo immer möglich, Oberboden und Unterboden getrennt ausgehoben und gelagert wurden. Es wurde zudem versucht immer bis zum Ausgangsgestein zu graben, was in den meisten Fällen aufgrund der geringen Bodenmächtigkeiten kein Problem darstellte. Das grosse Aufnahmeprotokoll der WSL enthält viele zusätzliche Aufnahmeparameter, die aber für diese Arbeit nicht von Relevanz sind. Bei den so genannten Expressprofilen wurde nur eine kleine Grube gegraben und kurz die wichtigsten Parameter wie Standortfaktoren, pH-Hellige, Humusform und Bodentyp protokolliert.

Da die ganze Feldarbeit auch mit administrativem Aufwand (Bewilligung der Nationalparkkommission) verbunden war und eine weitere Aufnahme vorläufig nicht zur Debatte steht, wurde beschlossen, dass alle Profile mehr oder weniger detailliert protokolliert werden sollten. Im Hinblick auf eine Modellierung wäre es sicher sinnvoller gewesen, wenn man eine grössere Anzahl Profile gegraben, diese aber nicht so detailliert angesprochen hätte. Die Ansprache der Profile benötigte relativ viel Zeit, und viele dieser Daten können für diese Arbeit nicht direkt verwendet werden. Diese ausführlichen Profilansprachen können als Grundlage für allfällige spätere bodenkundliche Arbeiten im Nationalpark dienen.

Um eine möglichst umfangreiche Anzahl Bodenprofile ansprechen zu können, wurde die Profilansprache in drei Stufen eingeteilt: Für die ausführliche Bodenansprache wurde das grosse Aufnahmeprotokoll der WSL (siehe Anhang) verwendet, während für die kleine Bodenansprache und die ‚Expressansprache‘ das kleine Aufnahmeprotokoll der WSL verwendet wurde. Als Anleitung dazu diente sowohl die Anleitung zur Bodenansprache im Feld (WSL, 2001), als auch die bodenkundliche Kartieranleitung (AG Boden, 1994). Die folgenden Bodenparameter und Standortfaktoren wurden bei Verwendung des kleinen Aufnahmeprotokolls festgehalten:

- Allgemeine Angaben: Aufnahmedatum, Profilnummer, Koordinaten, Photonummern, Landeskartennummer 1:25'000: Die Landeskoordinaten wurden mit einem Garmin GPS-

Gerät ermittelt. Im Hinblick auf die Modellierung wurde auf eine möglichst genaue GPS-Messung geachtet.

- Photographische Dokumentation: Die Umgebung aller Standorte sowie die dazugehörigen Profile wurden detailliert fotografiert.
- Geologie und Ausgangsgestein: Diese wurden aus der geologischen Karte (Dössegger, 1987) bestimmt und zusätzlich vom Ausgangsgestein das Mischverhältnis der Silikat- und Karbonatgesteinsanteile abgeschätzt.
- Reliefcode: Zur Bestimmung der vorherrschenden Geländeform wurde ein für die nähere Umgebung möglichst repräsentativer Standort gewählt, um den Einfluss des Mikroreliefs zu minimieren.
- Höhe und Exposition: Diese beiden Angaben stammten aus dem digitalen Höhenmodell und wurden nachträglich mit Hilfe der Profilkordinaten ermittelt.
- Hangneigung: Die Bestimmung erfolgte mit einem Neigungsmesser. Dabei wurde darauf geachtet, eine möglichst repräsentative Neigung für die nähere Standortumgebung zu ermitteln.
- Vegetation mit Bestandesbeschreibung: Wenn möglich wurden die wichtigsten Pflanzenarten bestimmt und protokolliert. Eine ausführliche Vegetationsaufnahme war aber teilweise aus Zeitgründen nicht möglich.
- Profilskizze mit Horizontbezeichnung: Die Bezeichnung der Horizonte richtete sich dabei grundsätzlich nach der Anleitung zur Bodenansprache (WSL, 2001).
- Profiltiefe und Probeentnahmetiefen.
- Humusform und Humusformindex: Der Humusformindex berechnet sich nach Möller (1981) wie folgt: Ah/F+H+Ah+Ah. Dieser dient als Hilfe zur Abschätzung der Humusform und der Humusqualität.
- Humusgehalt: Dieser wurde anhand der Horizontfarbe (siehe unten) abgeschätzt.
- Skelettklasse und Skelettgrößen. Mit der Skelettklasse wird der Anteil Skelett abgeschätzt, während die Skelettgrösse das Mischverhältnis von Grob- und Feinskelett beschreibt.
- Korngrösse der Feinerde: Die Korngrößen wurde mit der Fingerprobe ermittelt. Dabei wurde die Feinerde etwas befeuchtet, mit den Fingern zerrieben und anhand einer Schätzungstabelle (WSL, 2001) die Korngrößenverteilung bestimmt.
- Hydromorphie, Vernässungsmerkmale und aktuelle Bodenfeuchtigkeit.
- Abschätzung des Karbonatgehaltes von Skelett und Feinerde. Diese wurden mit einer Standardsalzsäurelösung (10 % HCl) ermittelt. Anhand dieser Informationen liess sich die ungefähre Kalkgrenztiefe bestimmen.
- Horizontfarbe: Diese erfolgte mit den Munsell Soil Color Charts an regelmässig durchfeuchteten Proben. Die Beleuchtung im Feld war wegen dem Wetter und der Tageszeit nicht immer optimal, womit geringe Abweichungen nicht auszuschliessen sind. Die Farbe wurde nach den Kriterien Farbart, Farbwert und Farbtiefe klassiert und als Farbcode notiert.
- Bodentyp: Der Bodentyp wurde aufgrund der oben beschriebenen Parameter anhand der ‚Schlüssel zur Klassifikation der Bodentypen der Schweiz‘ (Fitze, 1996) ermittelt und stellt den wichtigsten Parameter für diese Arbeit dar.

Für die spätere Analyse im Labor wurde, wenn möglich, aus jedem Horizont eine Sackprobe mit Bodenmaterial entnommen. Die Entnahme des Probenmaterials erfolgte von unten nach oben, um ein Vermischen des Materials aus verschiedenen Horizonten zu vermeiden. Die Menge des Probenmaterials variierte von wenigen 100 Gramm bis ungefähr 1 Kilogramm. Die Horizonte waren teilweise sehr geringmächtig, so dass nicht mehr Material entnommen werden konnte. Zudem beschränkte das tragbare Gewicht der Rucksäcke die Menge des Probenmaterials. Nicht wie normalerweise üblich, wurde die Profilgrube nach der Ansprache wieder sorgfältig zugeschüttet und der Standort möglichst so verlassen wie er angetroffen wurde.

3.1.2 Laboranalysen

Bei den Laboruntersuchungen ging es im Wesentlichen darum, im Feld bestimmte Parameter zu verifizieren. Dazu wurden folgende drei Laboranalysen durchgeführt:

- Korngrössenanalyse
- Messung des pH-Wertes
- C/N-Analyse

Die Bestimmung der Korngrössen im Feld erfolgte von Hand, indem etwas feuchte Feinerde mit den Fingern zerrieben (Fingerprobe), und dabei die Korngrössenanteile abgeschätzt wurden. Die Laboranalysen sollten zeigen, ob die Ansprache im Feld sich als zuverlässig erweist. Das Gleiche gilt auch für den pH Wert, da sich der pH mit der pH-Hellige im Feld nur relativ grob abschätzen liess. Das CN-Verhältnis diente primär dazu, die Nomenklatur der Oberbodenhorizonte zu überprüfen und allenfalls korrigieren zu können.

3.1.2.1 Probenaufbereitung und Archivierung

Da nach der Rückkehr aus der Feldarbeit die Trocknung der Proben nicht unmittelbar möglich war, wurden diese vorübergehend im Kühlraum der WSL gelagert. Die Bodenproben wurden bei 60°C während 48 h getrocknet, und schliesslich mit einem Mörser von Hand zerkleinert. Die Feinerde wurde mit einem Sieb (Maschenweite 2 mm) vom Bodenskelett getrennt und in Lagerdosen abgefüllt. Für allfällige spätere Untersuchungen wurde ein Handstück des Ausgangsgesteins der Feinerdeprobe beigelegt. Nach Abschluss der Laboranalysen wurden sämtliche Proben in der Pedothek der WSL eingelagert.

3.1.2.2 Messung des pH

Die Wasserstoffionenkonzentration charakterisiert den Säuregehalt eines Bodens (Scheffer et al. 2002). Sie wurde an der Feinerde mit einer CaCl_2 -Lösung bestimmt. Jeweils 10 g der Probe wurde in 20 ml CaCl_2 (0.01 M) aufgeschlämmt und nach 30 Minuten mit einer Hamilton-Elektrode gemessen (Zimmermann, 1997). Die Messung wurde sicherheitshalber doppelt durchgeführt, und aus beiden Messungen der Mittelwert ermittelt. Die Messung erfolgte an allen 168 Bodenproben.

3.1.2.3 Korngrössenverteilung

Die Korngrössenanalyse ist eine der grundlegenden Bodenanalysen. Daraus lassen sich schon recht gute Näherungswerte für Wasser- und Lufthaushalt, plastische Eigenschaften, Quellbarkeit, Austauschbarkeit und Nährstoffgehalt berechnen (Fitze et. al. 2002).

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde nur an einigen ausgewählten Bodenproben durchgeführt, da eine Analyse sämtlicher Horizonte sich als zu aufwändig erwiesen hätte. Die Proben wurden zuerst mit einer Wasserstoffperoxid-Lösung (30 % H_2O_2) behandelt, um das in der Feinerde enthaltene organische Material zu eliminieren. Anschliessend erfolgte die Bestimmung nach dem Prinzip von Stoke mittels Pipettenmethode, wobei das Probematerial in den Stehzyklindern mit einer Füllung von 2 % Calgonlösung sedimentiert wurde. An definierten Zeitpunkten wurden mit einer Pipette Proben entnommen und die darin enthaltene Menge an festem Material gravimetrisch ermittelt (Walther et. al. 2004). Dabei wurden die Korngrößenklassen Sand (0.063 – 2 mm), Schluff (0.002 – 0.063 mm) und Ton (< 0.002 mm) in Gewichtsprozenten erfasst.

3.1.2.4 C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis berechnet sich aus dem Totalstickstoffgehalt (N_{tot}) und dem organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}). Da die Proben vorwiegend aus Karbonatböden stammen, musste zusätzlich zu den Elementaranalysen von Stickstoff (N_{tot}) und Kohlenstoff (C_{tot}) noch der anorganische Kohlenstoffgehalt (C_{anorg}) ermittelt werden, um daraus das C_{org} berechnen zu können. Das C/N-Verhältnis wurde nur für die Oberbodenhorizonte ermittelt.

Die Bestimmung von N_{tot} und C_{tot} wurde vom Zentrallabor der WSL mit einem CN-Elementaranalysator gemessen. Die Probe wird in einem Zinnschiffchen in einer angereicherten Sauerstoffatmosphäre bei 1030 °C explosionsartig verbrannt. Das freiwerdende CO_2 wird festgehalten, indem es mit Hilfe eines Heliumgasstromes auf eine Absorptionssäule gebracht wird und an dessen Oberfläche aufgenommen wird. Später wird es mittels Ausheizen durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor geleitet. Die dabei entstehende Spannungsänderung des Detektors ist proportional zur Konzentration des CO_2 . Das zusätzlich entstehende Stickoxid wird für die Bestimmung von N_{tot} benötigt.

Von karbonathaltigen Proben musste zusätzlich noch der Anteil des anorganischen Kohlenstoffes mit einem Coulometer bestimmt werden. Das Karbonat der Probe wurde dabei in einem abgeschlossenen Reagenzglas mit Salzsäure (32 % HCl) aufgelöst und das freiwerdende CO_2 in ein Gefäss mit Kathodenflüssigkeit geleitet, welches in Verbindung mit einem Anodengefäss stand. Der dabei entstandene Strom zwischen Kathode und Anode wurde je nach Karbonatgehalt während 10 bis 15 Minuten gemessen, bis sämtliches Karbonat aufgelöst war. Der Coulometer berechnete daraus den Anteil anorganischen Kohlenstoffs in der Probe. Die Messung war bei einigen Proben insofern problematisch, da viel Dolomit enthalten war. Da Dolomit schwerer löslich ist als Calcit, dauerte die Messung oft relativ lange und musste aus Zeitgründen nach maximal 15 Minuten abgebrochen werden. Der daraus resultierende Messfehler befindet sich aber im Bereich von wenigen Gewichtsprozenten, was bei den hohen Dolomitanteilen nicht entscheidend ins Gewicht fällt.

3.1.3 Klassierung der Bodentypen nach Entwicklungsstufen

In Anlehnung an die ‚Klassifikation der Böden der Schweiz‘ (BGS & FAP, 1992) wurden die einzelnen Bodenprofile nicht nur nach Bodentypen sondern auch nach der Entwicklungsstufe klassiert. Im Hinblick auf die Modellierung der Bodentypen wurde dabei eine etwas vereinfachte Klassierung nach fünf Entwicklungsstufen (vgl. Tabelle 4) vorgenommen. Die Stufe 0 stellt das Ausgangsstadium der Bodenbildung dar. Für die Modellierung wurde dabei der Bodentyp ‚Kein Boden‘ definiert. Die ‚Kein Boden‘-Flächen bestehen aus vegetationslosen Schutt- und Felsgebieten. Die Entwicklungsstufen 1 und 2 bilden die Rohböden ohne Sekundärminerale, wobei die Unterscheidung innerhalb einer Entwicklungsstufe durch das geologische Substrat definiert wurde. Die Entwicklungsstufe 3 bildet den Übergang von den Roh-

böden der Stufe 1 und 2 zu den ‚Entwickelten Böden‘. Es gilt zu beachten, dass sich die Karbonatböden im Untersuchungsgebiet nur bis zur Stufe 3 (Rendzinen) entwickeln. Die Entwicklungsstufe 4 besteht aus Böden mit einem deutlichen B- oder E-Horizont. Die Nassböden, also Moore, Halbmoore und Gleye, können aufgrund ihrer wassergeprägten Entwicklung keiner dieser Entwicklungsstufen zugeordnet werden.

Tabelle 4: Überblick über die Bodenentwicklungsstufen in Anlehnung an die Bodenklassen der BGS & FAP

Entwicklungsstufe	Bodenklassen nach BGS & FAP (1992)	Modellierte Bodentypen
0	-	Kein Boden
1	Gesteinsböden	Silikatgesteinsboden Mischgesteinsboden Karbonatgesteinsboden Auengesteinsböden
2	Humus-Gesteinsböden	Humus-Silikatgesteinsboden Humus-Mischgesteinsboden Humus-Karbonatgesteinsboden
3	Unentwickelte Böden mit Sekundärmineralen	Regosol Ranker Rendzina
4	Entwickelte Böden	Neutrale Braunerde Podsol und Saure Braunerde

3.2 Herkunft und Aufbereitung der Modellinputdaten

3.2.1 Geologisches Substrat

Die geologischen Verhältnisse sind für die Bodenmodellierung von grosser Wichtigkeit, denn die Charakteristik des Ausgangsgesteins ist ausschlaggebend, welche Bodenbildungsprozesse während der Bodenbildung ablaufen. Die Intensität und Richtung der Bodenentwicklung ist in grossem Masse von Mineralbestand, Gefüge und Körnung des Ausgangsgesteins abhängig.

Als Grundlage für die Abbildung dieses Bodenbildungsfaktors im Modell diente die geologische Karte des Schweizerischen Nationalparks 1:50'000 (Dössegger, 1987), die heute digital als Teil des Nationalpark-GIS (GISSNP) verfügbar ist. Sie wurde 1987 unter der Leitung von Rudolf Dössegger gemeinsam von der Schweizerischen Geologischen Kommission, der Kommission für die wissenschaftliche Erforschung des Nationalparks (WNPk) und der Landeshydrologie herausgegeben. Sie entstand auf der Basis von verschiedenen geologischen Karten und diversen Dissertationen und Diplomarbeiten des Geologischen Institutes der ETH Zürich. Eine vereinfachte Version der geologischen Karte zeigt die Abbildung 2.

Analog der in Kapitel 2.3 beschriebenen Bodenentwicklungsreihen wurde die geologische Karte aufgrund des Karbonatgehaltes ihrer Kartierungseinheiten in drei Substratklassen unterteilt, welche in Tabelle 5 aufgelistet werden:

Tabelle 5: Die drei geologischen Substratklassen mit den jeweiligen Karbonatgehalten

Substratklasse	Karbonatgehalt
Karbonatisches Ausgangsgestein	> 75 %
Silikatisches Ausgangsgestein	< 5 %
Gemischt karbonatisch-silikatisches Ausgangsgestein	Zwischen 5 % und 75 %

In der vorliegenden Karte selbst sind keine Angaben über die Mineralogie der Einheiten enthalten und mussten deshalb aus den ‚Kommentaren zur Kartenlegende‘ in Trümpy (1997) entnommen und entsprechend klassiert werden. Die Angaben dazu basieren auf Schätzungen und beschreiben eine gewisse Bandbreite des Karbonatgehaltes. Folglich war die Klassierung nicht immer eindeutig. Zudem wechseln sich innerhalb einiger geologischen Einheiten karbonatische mit silikatischen Gesteinen ab. Diese kleinräumigen Wechsel der Mineralogie kann von der Karte aufgrund des Massstabes von 1:50'000 nicht berücksichtigt und dargestellt werden.

Tabelle 6: Zuweisung der geologischen Kartierungseinheiten (Dössegger, 1987) zu einer Substratklasse (Mischgesteinssubstrat findet sich nur in den individuell überarbeiteten geologischen Einheiten)

Geologische Einheit	Substratklasse
Schutt und Blockströme	individuell überarbeitet
Verkitteter Schotter	individuell überarbeitet
Moräne	individuell überarbeitet
Channels-Formation	Karbonatisches Substrat
Russenna-Aptychenkalk	Karbonatisches Substrat
Blais-Radiolarit	Silikatisches Substrat
Allgäu-Formation	Karbonatisches Substrat
Chaschauna-Breccie	Karbonatisches Substrat
Koessen-Formation	Karbonatisches Substrat
Murter-Plattenkalk	Karbonatisches Substrat
Murteret-Dol./Mueschauns-Dolomit (S)	Karbonatisches Substrat
Diavel-Formation	Karbonatisches Substrat
Crappa-Mala-Mergel	Karbonatisches Substrat
Quattervals-Formation	Karbonatisches Substrat
Pra-Grata-Formation	Karbonatisches Substrat
Raibler-Formation	Karbonatisches Substrat
Raibler Rauwacke	Karbonatisches Substrat
Parai-Alba-Dolomit	Karbonatisches Substrat
Vallatascha-Dolomit	Karbonatisches Substrat
Turettas-Dolomit	Karbonatisches Substrat
S-charl-Kalk	Karbonatisches Substrat
Fuorn-Formation	Silikatisches Substrat
Chazfora-Formation (V.M.-Verrucano p.p.)	Silikatisches Substrat
Quarzporphyr	Silikatisches Substrat
Diabas-Gänge	Silikatisches Substrat
Gesteine vom Orthogneis-Typus	Silikatisches Substrat
Paragneise und Mischgneise	Silikatisches Substrat
Amphibolite	Silikatisches Substrat
Koessen-Formation	Karbonatisches Substrat
Hauptdolomit-Formation	Karbonatisches Substrat

Raibler-Formation	Karbonatisches Substrat
Raibler Rauwacke und Gips	Karbonatisches Substrat
granitoides bis gabbroides Kristallin	Silikatisches Substrat
Serpentinit, Ophicalcit	Silikatisches Substrat
Diabas, Spilit, Grünschiefer	Silikatisches Substrat
Metamorphite	Silikatisches Substrat
Sumpf, Moor, Schwemmebene	individuell überarbeitet
Terrassen, Schutt ... Sackungen	individuell überarbeitet

Über 50 % der kartierten Fläche bestehen aus nur gerade zwei geologischen Einheiten, den Moränen und sonstigen quartären Ablagerungen (Schutt- und Schwemmfächer, Schotter, Alluvionen). Weder in der Kartierung noch in den Erläuterungen liessen sich Informationen zur Mineralogie resp. dem Mischverhältnis finden, was eine Nachdigitalisierung dieser beiden geologischen Einheiten unumgänglich machte. Die Feldarbeiten zeigten deutlich, dass Moränenmaterial nicht prinzipiell dem Substrat Mischgestein zugeordnet werden kann. In vielen Fällen konnte auf kartierten Wall- oder Grundmoränenflächen kein silikatisches Material beobachtet werden.

Die Nachbearbeitung der geologischen Karte erfolgte unter Berücksichtigung der Lockersubstratkarte der geomorphologischen Kartierung sowie anhand der topographischen Verhältnisse (Einzugsgebiet und Neigung). Die Lockersubstratkarte beschreibt das Mischverhältnis von Verrucano- und Karbonatlockergesteinen. Diese ist jedoch räumlich extrem stark generalisiert. Auf der Basis dieser Grundlagen wurden die Mischgesteinsflächen (orange Flächen) digitalisiert. Abbildung 8 zeigt die Aufbereitung der quartären Ablagerungen am Beispiel des Schwemmfächers von ‚God Margun Vegl‘ vor und nach der Bearbeitung. Das Einzugsgebiet des Schwemmfächers besteht sowohl aus karbonatischen (in Abbildung 8 blau) als auch silikatischen (in Abbildung 8 rot) Gesteinen. Unter Berücksichtigung des Reliefs und des geomorphologischen Ablagerungsmilieu (fluvial, denudativ) konnte die Fläche der Mischgesteinsablagerungen abgeschätzt werden.

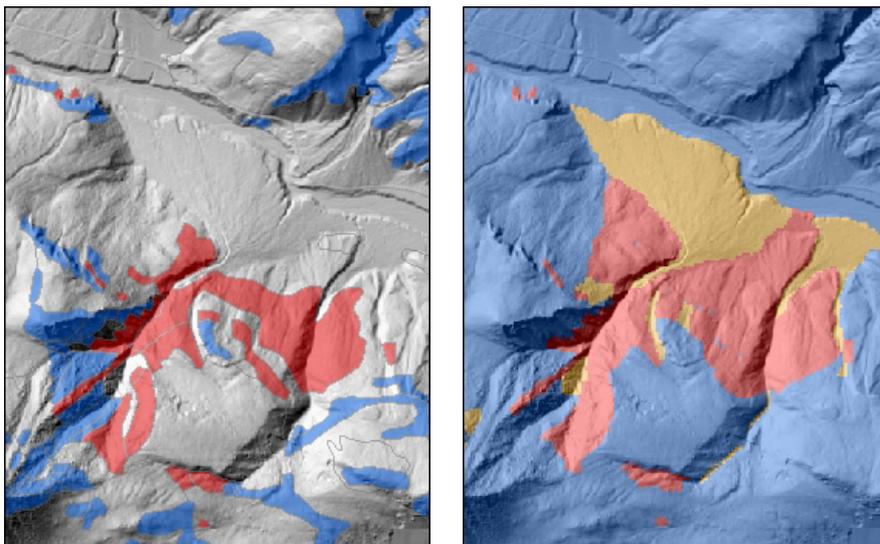


Abbildung 8: Überarbeitung der quartären Ablagerungen am Beispiel des Schwemmfächers ‚God Margun Vegl‘

Der Kartierungsperimeter der geologischen Karte 1:50'000 verläuft ungefähr entlang der Engadiner Linie, deckt also nicht das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Die nördlich davon gelegenen Gebiete (Margun und Unterengadin) wurden anhand der tektonischen Karte als silikatische Substrate klassiert. Trotz der manuellen Überarbeitung muss man sich im Klaren sein, dass die in Abbildung 9 dargestellte Substratkarte immer noch eine grobe Generalisierung der tatsächlichen Verhältnisse darstellt. Gerade das Mischverhältnis der Grund- und Wallmoränen lässt sich mit den vorhandenen digitalen Grundlagen nicht bestimmen und wäre somit einzig und allein in aufwändiger Feldarbeit kartierbar. Aber auch die anstehenden geologischen Einheiten bestehen teilweise, wie schon erwähnt, aus einer Wechselschichtung von silikatischen und karbonatischen Gesteinen, welche in der verwendeten Substratkarte nicht berücksichtigt werden konnten.

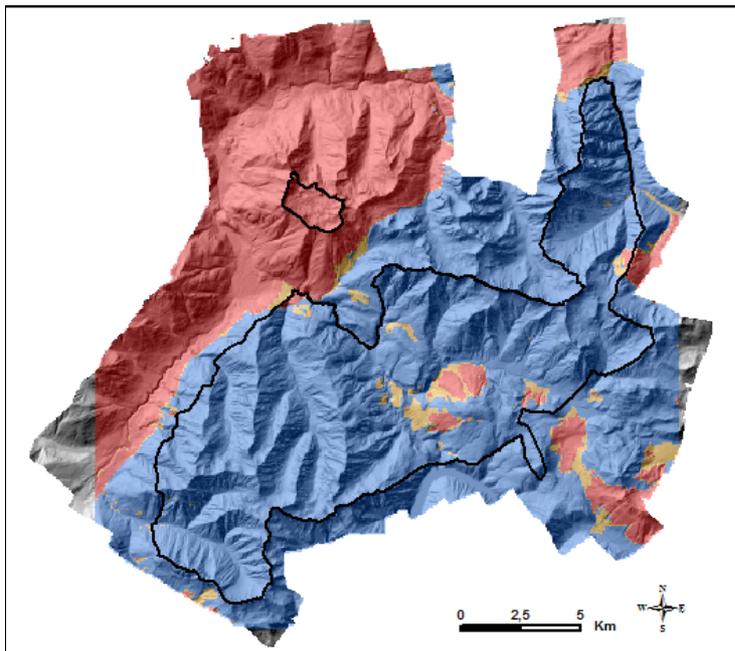


Abbildung 9: Die geologische Substratkarte des Untersuchungsgebietes

3.2.2 Die primäre Bodenbedeckung

In einer ersten Phase dieser Diplomarbeit wurde die ‚Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks und seiner Umgebung 1:50'000‘ von Heinrich Zoller (Zoller, 1992) verwendet, welche ebenfalls digital im GIS des Nationalparks (GISSNP) vorhanden ist. Sie deckt das ganze Unterengadin inklusive des Nationalparks ab. Sie wurde grösstenteils von gegenüberliegenden Hängen kartiert und zeigt folglich die räumliche Verteilung der Waldgesellschaften. Über der Waldgrenze unterscheidet sie nur Magerwiesen von Schutt- und Geröllflächen. Räumlich ist sie stellenweise relativ ungenau kartiert worden, speziell die Grenzen zwischen Wald und sonstigen Flächen ist an vielen Stellen stark generalisiert.

Aus diesen Gründen wurde auf die Verwendung dieser Datengrundlage verzichtet und stattdessen die räumlich viel besser aufgelöste Vec25-Primärflächen¹ verwendet. Dieser Datensatz ist Teil des digitalen Landschaftsmodells der Schweiz und basiert inhaltlich sowie geomet-

¹ Vec25 © 2006 Swisstopo (BV 033492)

risch auf der Landeskarte 1:25'000. Die Qualität dieser Daten ist recht gut. Die Lagegenauigkeit der Objekte beträgt 3 – 8 Meter, wobei sich diese Toleranz aus der Zeichengenauigkeit der Landeskarte ergibt (Swisstopo, 2004). Die verwendeten Primärflächen beschreiben die primäre topographische Bodenbedeckung. Die Flächenarten dieser Datenebene schliessen sich gegenseitig aus und bilden somit ein redundanzfreies, lückenloses Flächenmosaik.

Die Vec25-Primärflächen wurden in sieben Klassen eingeteilt, wovon auf den ersten vier Klassen (Code 1 - 4) eine Bodenbildung stattfinden kann, während die übrigen drei Klassen (Anthropogene Flächen, Gletscher, Gewässer) Flächen darstellen, auf denen sich keine Böden entwickeln können oder diese durch den Menschen abgetragen worden sind.

Bedeckungsklasse	Codierung im Modell
Wald/Gebüsch	1
Wiese/Weide	2
Schutt/Fels	3
Sumpf	4
Gletscher	5
Gewässer	6
Anthropogene Flächen	7

Tabelle 7: Die zusammengefassten Bedeckungsklassen

Man muss sich bewusst sein, dass die Bedeckungsklassen Wald/Gebüsch, Wiese/Weide, Schutt/Fels und Sumpf eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse darstellen. Wünschenswert, im Hinblick auf die Modellierung von Bodentypen, wären beispielsweise räumliche Datensätze zur Krautschichtverteilung in Waldbeständen, Produktion von organischem Material oder dem Grad der Vegetationsbedeckung auf alpinen Wiesen und Weiden. Mit solchen Informationen könnte der Vegetationseinfluss auf die Bodenentwicklung viel besser charakterisiert und quantifiziert werden.

Die Tabelle 8 zeigt die Klassierung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Vec25-Objekte nach den Bedeckungsklassen.

Objekt der Vec25-Primärfläche	Bedeckungsklasse
Baumschule	Wald/Gebüsch
Fels	Fels/Schutt
Fluss	Gewässer
Gebüsch	Wald/Gebüsch
Geröll mit Gebüsch	Fels/Schutt
Geröll auf Gletscher	Gletscher
Geröll	Fels/Schutt
Geröll in Wald	Wald/Gebüsch
Geröll in offenem Wald	Fels/Schutt
Gletscher	Gletscher
Kiesgrube	Anthropogene Flächen
See	Gewässer
Siedlung	Anthropogene Flächen
Staumauer	Anthropogene Flächen
Sumpf	Sumpf
Sumpf in Wald	Sumpf
Übriges Gebiet	Wiese/Weide
Wald	Wald/Gebüsch
Wald offen	Wald/Gebüsch

Tabelle 8: Zuweisung der Vec25-Objekte zu den Bedeckungsklassen

3.2.3 Das digitale Höhenmodell (DHM)

Das DHM repräsentiert den Bodenbildungsfaktor Topographie und indirekt auch die klimatischen Verhältnisse (vgl. Kapitel 2.1.5).

Das zur Verfügung stehende DHM wurde im Rahmen der Aufbereitung und Referenzierung eines Nahinfrarot-Luftbildmosaiks für den Nationalpark erstellt. Es besteht aus einem Mosaik von verschiedenen Höhenmodellen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. Die Auflösung ist im Gebiet des Ofenpasses mit einem Meter hervorragend, dies aufgrund einer hoch auflösenden Vermessung mit Lasertechnologie (LIDAR). Die in Abbildung 10 gelb gefärbten Flächen haben eine Auflösung von 4 Metern und wurden mittels Stereoskopie aus dem Nahinfrarot-Luftbild berechnet. Da diese stereometrische Höhenmodellberechnung die Oberfläche des Waldes abbildet, sowie zusätzlich in schattigen Bereichen des Luftbildes nicht funktioniert, wurde in waldigen und schattigen Gebieten das 10-Meter Höhenmodell des Nationalparks oder das 25-Meter Höhenmodell der Swisstopo verwendet.

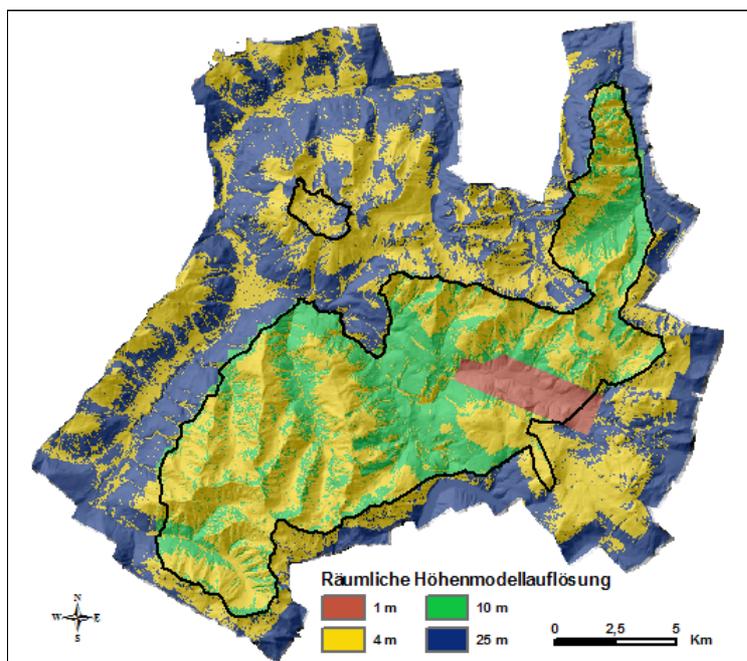


Abbildung 10: Überblick des verwendeten Höhenmodell-Mosaiks

Die Qualität und Bandbreite der einzelnen Höhenmodelle war ausschlaggebend, mit welcher Auflösung die Bodenmodellierung berechnet werden sollte. Das DHM-Mosaik wurde schliesslich auf eine einheitliche Auflösung von 10 Metern umgerechnet, da diese Auflösung einen Kompromiss zwischen dem hoch aufgelösten 1-Meter-DHM und dem ‚schlecht‘ aufgelösten DHM25 der Swisstopo darstellt. Diese Auflösung repräsentiert das Relief im mesoskaligen Bereich (20 - 50 Meter). Es darf dabei nicht vergessen werden, dass kleine Geländeformen nicht abgebildet werden, obwohl diese für diverse Bodenbildungsprozesse von Bedeutung sind.

Neigung

Die Neigung lässt sich direkt aus dem 10-Meter-Höhenmodell (DHM10) ableiten und beschreibt die Steilheit des Geländes in Fallrichtung. Je steiler ein Hang ist, desto grösser ist seine Erosionsanfälligkeit und desto flachgründiger ist er im Allgemeinen (Jenny, 1980). Die Berechnung der Neigung einer Rasterzelle basiert auf einer Flächenfunktion, die durch alle 8

Nachbarzellen verläuft. Die resultierende Ausrichtung der Funktionsoberfläche repräsentiert dabei die Exposition, aus welcher sich mittels der ‚Average-Maximum-Technik‘ die Neigung ableiten lässt (siehe dazu Burrough, 1986).

Curvature

Die Curvature beschreibt die Krümmung der Geländeoberfläche in Fallrichtung (Profile Curvature) und entlang der Höhenlinien (Plan Curvature) (siehe Abbildung 11). Für die Bodenmodellierung wurde nur die ‚Profile Curvature‘ verwendet, da diese im Gegensatz zur ‚Plan Curvature‘ einen grösseren Einfluss auf die Bodenbildung ausübt. An konkaven Hanglagen (Mulden, Hangfuss) entstehen durch die Akkumulation von Bodenmaterial im Allgemeinen tiefgründigere und mächtigere Böden als auf konvexen Lagen (Kuppen, Hangkanten). Dort sind die Böden wegen langer Bodenfrostperioden, Winderosion und wegen geringer Sickerwassermengen flachgründiger als in Mulden (Turner & Blaser, 1977). Die Profile Curvature berechnet sich wie die Neigung aufgrund einer Flächenfunktion der 8 umliegenden Nachbarzellen. Sie stellt die zweite Ableitung der resultierenden Funktion in Fallrichtung der Funktionsebene dar. Negative Werte repräsentieren den Grad an konvexer Krümmung, die positiven Werte folglich die konkave Krümmung. Da der Einfluss auf die Bodenbildung bei schwacher Hangkrümmung nur gering ist, werden die leicht negativen resp. positiven Werte als nicht gekrümmte Werte klassiert.

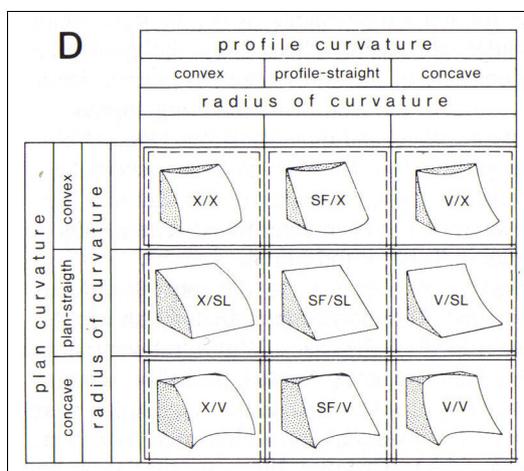


Abbildung 11: Kombination von Profile- und Plancurvature nach Dikau 1990

Die Klassierung der beschriebenen Inputfaktoren Höhe, Neigung und Profile Curvature basiert auf einem Fuzzy-theoretischen Ansatz und wird daher in Kapitel 3.3.4.3 behandelt.

Flow Accumulation

Für die Modellierung der Nassböden (vgl. Kapitel 3.3.6) wurde aus dem DHM ausserdem die hydrologische Einzugsgebietsgrösse für jede einzelne Rasterzelle berechnet. Dazu wurde zuerst ein Fließrichtungsraster (‚FlowDirection-Grid‘) berechnet, welches die Abflussrichtung jeder Rasterzelle zum jeweils steilsten abfallenden Nachbarn repräsentiert. Aus diesem wurde in einem zweiten Schritt ein ‚FlowAccumulation-Grid‘ berechnet, indem in jeder Zelle die Anzahl der zuvor durchflossenen Zellen aufsummiert wurde. Da die ganze Modellierung mit einer Rasterauflösung von 10 mal 10 Metern berechnet wurde, lässt sich aus den Flow-Accumulation-Werten die Grösse des Einzugsgebietes ableiten. So entspricht beispielsweise ein Flow-Accumulation-Wert von 300 einer Fläche von 30'000 m².

Exposition

Die Exposition, also die Ausrichtung des Hanges in Fallrichtung, lässt sich prinzipiell auch anhand des Höhenmodells ableiten, wurde jedoch nicht in die Modellierung einbezogen, da eine gegenläufige Tendenz bezüglich des Einflusses auf die Bodenbildung besteht. Einerseits bewirken die höheren Bodentemperaturen an südlichen Expositionen eine im Allgemeinen grössere biologische Aktivität. Andererseits wirkt sich die damit verbundene erhöhte Trockenheit wieder negativ auf die Bodenentwicklung aus. Welcher Einfluss auf die Bodenbildung überwiegt, ist sehr schwierig abzuschätzen und hängt zudem stark von anderen Faktoren wie beispielsweise der Vegetationsbedeckung ab.

3.2.4 Die Bodeneignungskarte

Die Bodeneignungskarte 1:200'000 (Frei et al. 1980) wurde 1980 von den Bundesämtern für Raumplanung, Landwirtschaft und Forstwesen herausgegeben. Im Gegensatz zu Bodenkarten, welche pedologische Eigenschaften darstellen, liegt das inhaltliche Schwergewicht der Bodeneignungskarte auf der Darstellung und Interpretation der pflanzlichen Anbaueignung.

Sie bietet einen guten gesamtschweizerischen Überblick über die grossräumigen bodenkundlichen Verhältnisse. Dazu ist aber der Massstab mit 1:200'000 zu klein, um detaillierte Bodentypunterschiede darstellen zu können. Darum unterscheidet die Bodeneignungskarte gesamt- haft 144 Kartierungseinheiten, die nach 25 physiographischen Klassen (Einheiten A bis Z) zusammengefasst sind, wobei innerhalb dieser Bodenkomplexe verschiedene Bodentypen vorkommen können.

Die Bodeneignungskarte 1:200'000 wurde in dieser Arbeit nur für einen Vergleich mit der modellierten Bodentypenkarte verwendet. Sie als Datengrundlage für die Modellierung zu gebrauchen, kam aufgrund ihrer kleinmasstäblichen Auflösung und starken inhaltlichen Generalisierung nicht in Frage. Abbildung 12 zeigt die sechs im Untersuchungsgebiet vorkommen- den physiographischen Bodeneignungseinheiten.

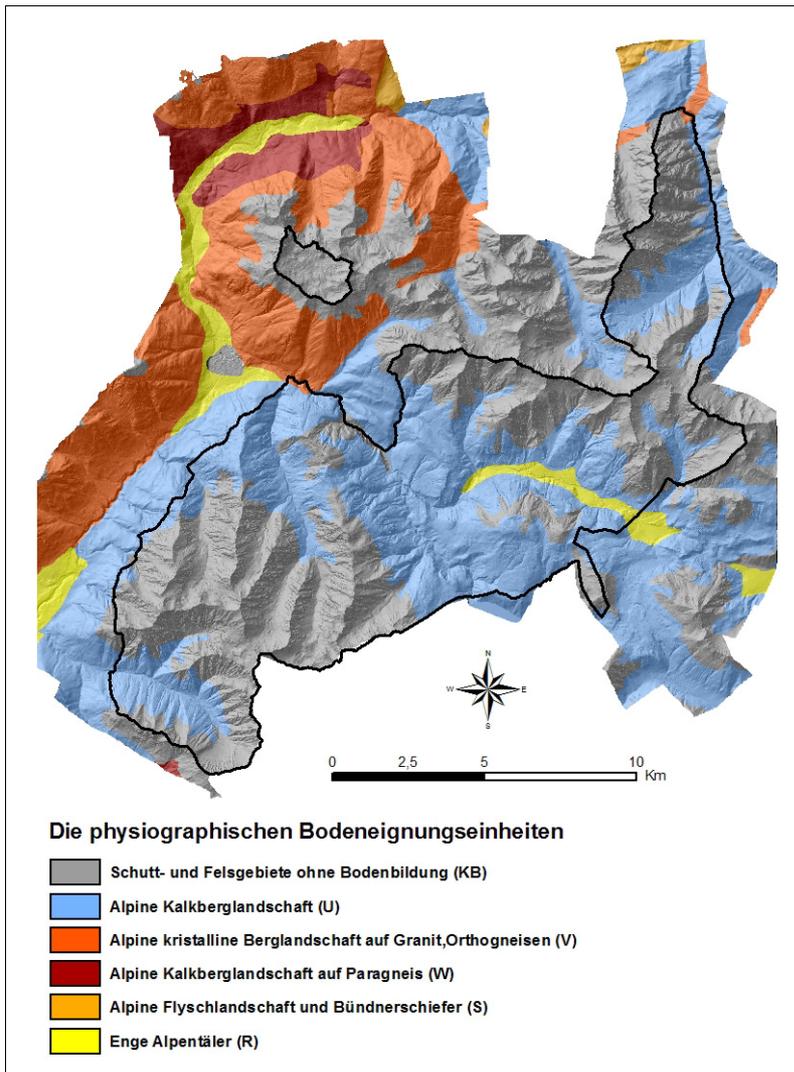


Abbildung 12: Die physiographischen Einheiten der Bodeneignungskarte 1:200'000

3.3 Modellierung

3.3.1 Einführung

Das ursprüngliche Ziel dieser Diplomarbeit war den von Margreth (2004) im Oberengadin verwendeten Modellansatz auf das Gebiet des Nationalparks anzupassen und im Speziellen auf Karbonatgesteinen zu verbessern. Dieses Modell wurde im Grundsatz von Egli et al. (2004) entwickelt und basiert auf einer Verfeinerung der Bodeneignungskarte 1:200'000 (Frei, 1980). Die Berechnung der Bodentypen erfolgte mittels dem Entity-Relationship-Prinzip, bei dem die klassierten Datensätze auf Basis von Regeln miteinander verschnitten werden (Margreth, 2004). Die Tatsache, dass zu Beginn der Arbeit nur ein Höhenmodell des Nationalparks zur Verfügung stand und die Bodeneignungskarte innerhalb der Nationalparkgrenzen nur aus einer Einheit besteht, verunmöglichte eine differenzierte Modellierung mit dem Modell von Margreth (2004) und Egli et al. (2004). Darum wurde beschlossen, einen eigenen Modellansatz zu entwickeln, im Wissen, dass dies im Rahmen einer Diplomarbeit ein schwieriges Unterfangen sein würde. Nach den Feldarbeiten in der Anfangsphase der Modellentwicklung stand ein verbessertes Höhenmodell (siehe Kapitel 3.2.3) zur Verfügung, welches neben dem Nationalpark auch das angrenzende Unterengadin mit einschliesst. Der Modellierungsperimeter konnte somit vergrössert werden, um die spärlich vorhandenen Profildaten um einige Standorte zu erweitern.

Es ist klar, dass eine physikalische Herangehensweise bei der Modellierung von Bodentypen nicht möglich ist, da die Nomenklatur der Böden nicht auf physikalischen Eigenschaften beruht, sondern auf genetischen und morphologischen Merkmalen. Daher wurde für die Modellierung ein heuristischer, also erkenntnistheoretischer Ansatz verwendet, der mehr auf qualitativen Erkenntnissen als auf statistischen Analysen beruht. Eine rein geostatistische Modellierung mit multivariaten Analyseverfahren wurde zu Beginn der Arbeit evaluiert, aufgrund der kleinen Anzahl verfügbarer Profilstandorte aber als nicht durchführbar erachtet. Mit dem Einsatz von Fuzzy-Logik im Modell wurde eine Verbesserung des heuristischen Modellansatzes von Egli (2004) angestrebt. Die Verwendung von Fuzzy-Klassen erlaubt es, kontinuierlich auftretende Bodentypen grundsätzlich realistischer nachzubilden und zusätzlich unscharfes, auf Abschätzung beruhendes Erfahrungswissen nachvollziehbar zu verarbeiten.

Die Implementierung der Modellstruktur im GIS erfolgte mit dem Softwarepaket ArcGIS von ESRI und der Arc Macro Language (AML). Diese inzwischen etwas veraltete Makrosprache von ESRI wurde aus zwei Gründen verwendet. Erstens genügten die Funktionen dieser Programmiersprache den gestellten Anforderungen und zweitens wurden mit AML schon Erfahrungen gemacht, was die Programmierung erheblich vereinfachte. Die ganze Modellierung wurde auf der Basis von Grids (ESRI-Rasterdatenmodell) berechnet. Sämtliche Rohdatensätze wurden in Grids konvertiert, entsprechend aufbereitet und schliesslich miteinander verrechnet. Die Qualität des Höhenmodells bestimmte im Wesentlichen die Zellengrösse von 10 Metern (siehe Kapitel 3.2.3).

Die Grundlage der Modellberechnungen bildeten verschiedene Datensätze mit unterschiedlichen Massstäben. Die geologische Karte (Dössegger) wurde im Massstab 1:50'000 angefertigt während die Primärflächen von Vector25 auf den Landeskarten 1:25'000 beruhen. Das Höhenmodell besteht wie schon erwähnt aus einem Mosaik von verschieden gut aufgelösten Höhenmodellen.

3.3.2 Modellstruktur und Datenfluss

Abbildung 13 zeigt den Datenfluss und die grundlegende Struktur des Modells. Die Inputdatensätze werden aus den Rohdatensätzen generiert und fließen in die Modellmodule ein. Die Aufbereitung der Inputdatensätze wurde bereits in Kapitel 0 beschrieben. Die Modellierung der Bodentypen besteht grundsätzlich aus drei unabhängigen Modulen, wobei das Modul der Terrestrischen Böden mit Abstand das Wichtigste ist. In diesem fließen die geologische Substratkarte, die primäre Bodenbedeckung sowie Höhe, Neigung und Curvature ein und werden mit Fuzzy-Logic miteinander verrechnet. Die beiden anderen Module der Auengesteinsböden und Nassböden bestehen im Vergleich zum terrestrischen Modul nur aus einigen einfachen Modellbedingungen. Da die Auengesteinsböden und Nassböden im Untersuchungsgebiet verhältnismässig selten vorkommen, wurde das Schwergewicht auf die Modellierung der terrestrischen Böden gelegt. Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben den Aufbau der einzelnen Module und den Validierungsprozess im Detail.

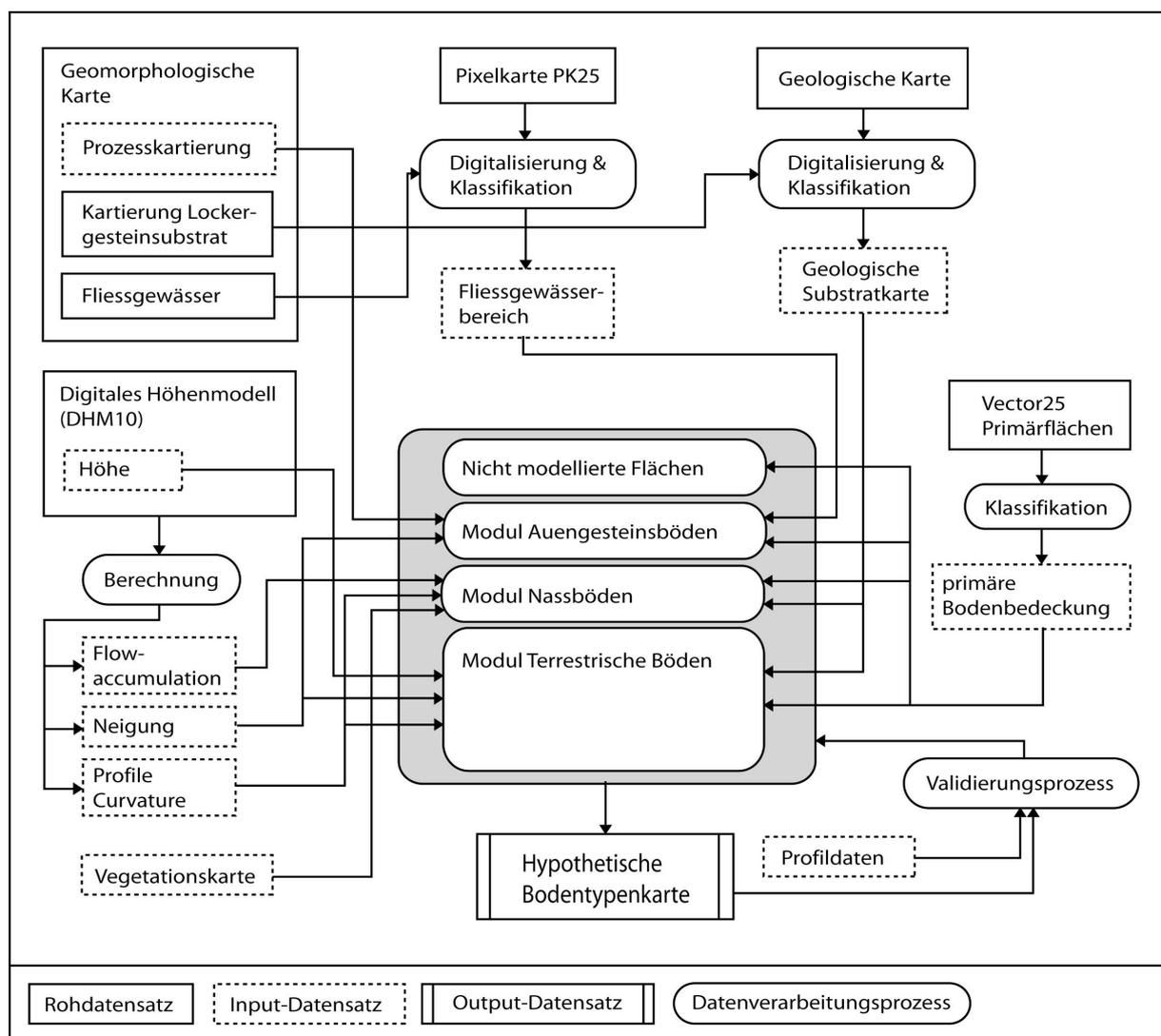


Abbildung 13: Datenflussdiagramm und Modellstruktur

3.3.3 Bodenkundliche Modellgrundlagen

In diesem Kapitel sollen die dem Modell zugrunde liegenden bodenkundlichen Annahmen definiert und diese mit Hilfe einer Analyse der Profildaten untermauert werden. Dabei kann die Entwicklungstendenz bei der primären Bodenbedeckung aus der Bodentyphäufigkeit abgeschätzt werden und bei den Inputvariablen Höhe, Neigung und Curvature soll die Beziehung anhand einer bivariaten Korrelation hergestellt werden.

Aufgrund der sehr beschränkten Anzahl Bodenprofile war es bei diesen Analysen nicht möglich, den Einfluss von anderen Bildungsfaktoren zu minimieren. Zur Untersuchung eines Bodenbildungsfaktors hätte man optimalerweise nur Profile verwenden sollen, bei denen alle anderen Einflussvariablen sich mehr oder weniger konstant verhielten. Dieser Umstand erklärt im Wesentlichen die grosse Streuung der Profildaten innerhalb der Entwicklungsstufen.

3.3.3.1 Primäre Bodenbedeckung

Die primäre Bodenbedeckung soll in stark vereinfachter Form den Bodenbildungsfaktor Vegetation repräsentieren. Dieser steht in sehr enger Wechselwirkung zum Boden (vgl. Kapitel 2.1.3). Bei diesem Inputfaktor wird, wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt, nach drei Klassen Wald/Gebüsch, Wiesen/Weiden und Schutt/Fels unterschieden. Dabei soll von der Annahme ausgegangen werden, dass im Wald prinzipiell die entwickeltsten Böden, auf Fels- und Schuttflächen hingegen die unentwickeltsten Böden vorzufinden sind. Auf Wiesen und alpinen Weiden können prinzipiell sowohl entwickelte als auch rohe Böden vorkommen.

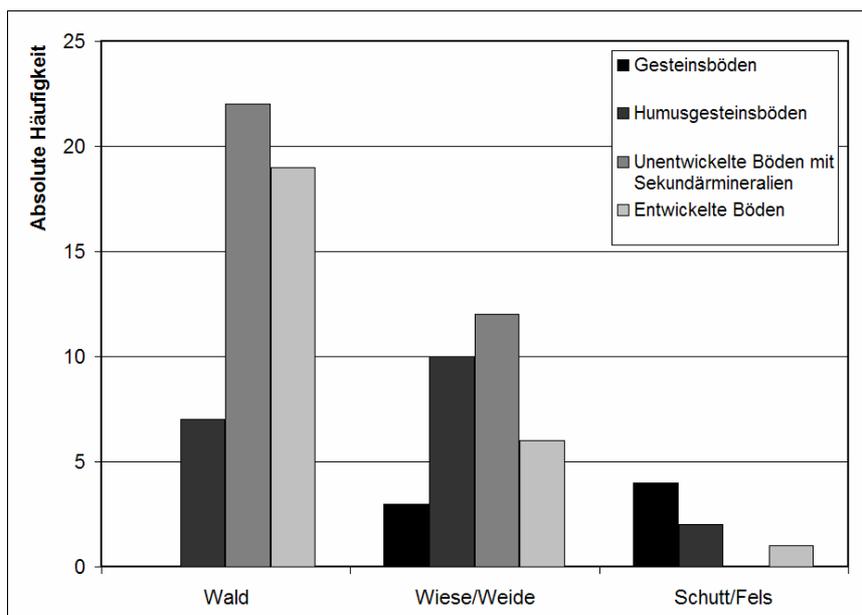


Abbildung 14: Absolute Bodenprofilhäufigkeiten auf den jeweiligen Bodenbedeckungsklassen

Abbildung 14 zeigt die absolute Häufigkeit der im Feld angesprochenen Bodenprofile nach Bedeckungsklassen und Entwicklungsstufen. Von den 48 Waldbodenprofilen wurden 41 (85 %) als entwickelte oder unentwickelte Böden mit Sekundärmineralien angesprochen. Hingegen fehlen die Gesteinsböden gänzlich in dieser Klasse. Wiese/Weide-Flächen finden sich sowohl unter der Waldgrenze und somit auf ehemaligen Waldstandorten, als auch in grosser Höhe mit extremen klimatischen Verhältnissen. Dies führt dazu, dass auf Wiesen und Weiden Böden von allen vier Entwicklungsstufen vertreten sind, die Dominanz jedoch bei den Hu-

musgesteinsböden und den unentwickelten Böden mit Sekundärmineralien liegt. Auf Schutt- und Felsflächen finden sich mit einer Ausnahme nur noch Gesteins- und Humusgesteinsböden. Es darf dabei nicht vergessen werden, dass die Häufigkeitsverteilung in den jeweiligen Bedeckungsklassen auch stark von der Wahl des Profilstandortes abhängt.

3.3.3.2 Höhe

Im Modell ist der Einfluss der Höhe von sehr grosser Bedeutung, da damit indirekt verschiedene Bodenbildungsfaktoren repräsentiert werden können. Mit der Höhenlage verändern sich vor allem die klimatischen Verhältnisse. Generell nehmen die Temperaturen ab, die Niederschlagsmengen jedoch zu. Dadurch ergibt sich eine Höhenzonalität von Bodeneigenschaften und Vegetation, wie sie auch schon von Braun-Blanquet und Jenny (1926) im Nationalpark beschrieben wurde. Zudem kann in stark vereinfachter Form auch das Bodenalter über die Höhe abgebildet werden, wenn man davon ausgeht, dass sich die Gletscher am Ende der letzten Eiszeit zuerst aus den tiefer gelegenen Haupttälern zurückzogen. Diese Aussage soll und kann aber nur als Tendenz bejaht werden, denn das tatsächliche Bodenalter hängt mit Sicherheit stärker von den lokal vorherrschenden geomorphologischen Verhältnissen ab.

Die Annahme, dass die Entwicklung der Böden mit der Höhe im Allgemeinen abnimmt, lässt sich anhand der Bodenprofile relativ gut bestätigen. Dafür wurde eine lineare Regression für 82 der gesamthaft 89 Bodenprofile berechnet. Bei den sieben weggelassenen Profilen handelt es sich entweder um Nassböden, bei denen keine Klassierung nach den Entwicklungsstufen vorgenommen wurde, oder aber um Ausreisser, die wegen ihrer verzerrenden Wirkung ausgeschlossen werden mussten.

Nach Bahrenberg (1999) werden Ausreisser folgendermassen bestimmt: Man berechnet den Mittelwert (m) und die Standardabweichung (s) der Stichprobenelemente ohne die fraglichen Ausreisser. Liegt der Variablenwert der Ausreisser ausserhalb des Intervalls $m \pm 4 \times s$, so bleibt er ausgeschlossen.

Die Streuung innerhalb der einzelnen Entwicklungsklassen ist, wie schon erwähnt, recht gross. Aufgrund der Form und der Steigung der Regressionsgeraden lässt sich jedoch eine klare Beziehung zwischen Höhe und Entwicklungsstufe erahnen. Das Bestimmtheitsmass R^2 beträgt 0,295, der Pearson'sche Korrelationskoeffizient R somit 0,543. Die Beziehung zwischen der Höhe und der Entwicklungsstufe ist bei einer 10 prozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit klar und deutlich signifikant, da der Korrelationskoeffizient R den kritischen Schwellenwert von 0,181 (aus Bahrenberg et al., 1999) nicht unterschreitet.

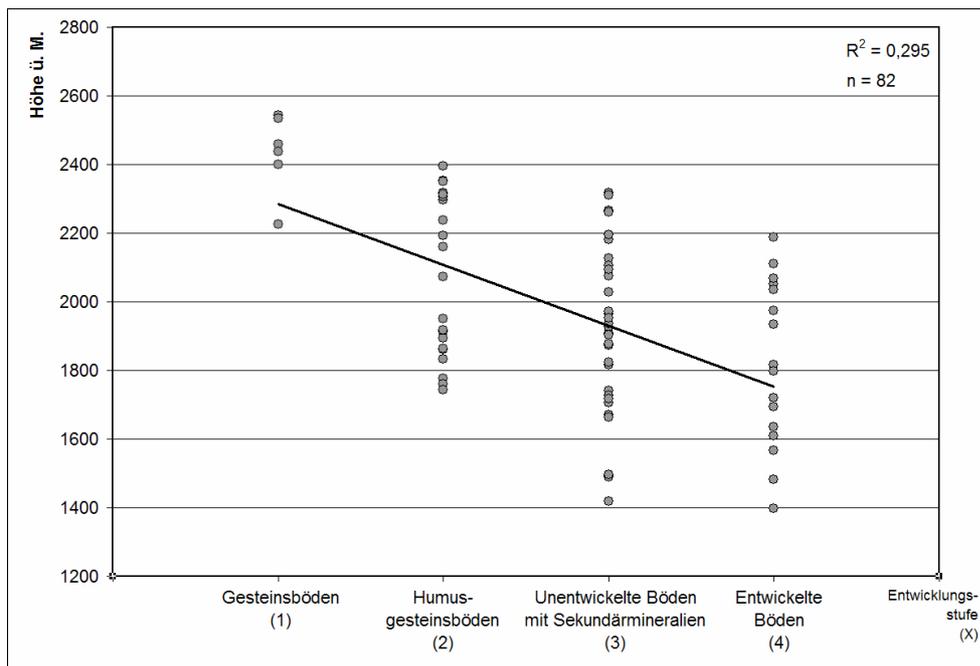


Abbildung 15: Lineare Korrelation zwischen Höhe und Entwicklungsstufe

Tabelle 9: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Höhe und Entwicklungsstufe

Anzahl Stichproben	82
Mittelwert \bar{m}	1968
Standardabweichung s	277
Regressionsgerade	$y = -176,9x + 2461,8$
Bestimmtheitsmass R^2	0,295
Pearsonscher Korrelationskoeffizient R	0,543
Kritische Signifikanzschwelle bei $n = 82$ und $\alpha = 10\%$	0,181

3.3.3.3 Neigung

Bei der Neigung soll von der Annahme ausgegangen werden, dass mit zunehmender Steilheit die Erosionsanfälligkeit steigt und somit die Böden im Allgemeinen flachgründiger und weniger entwickelt sind. Dieser Effekt ist vor allem in spärlich bewachsenen Gebieten nicht zu unterschätzen, da dort keine stabilisierende Vegetationsdecke vorhanden ist. Walthert et al. (2004) beschreiben diesen Umstand folgendermassen: «Die Böden in ebenen Lagen sind tendenziell tiefgründig. In Hanglagen kommt eine laterale oder oberflächenparallele, hangabwärts gerichtete Komponente hinzu, die sich nicht nur auf den Transport gelöster Stoffe beschränkt, sondern auch festes Bodenmaterial einschliesst. Abfliessendes Oberflächenwasser kann Bodenerosion verursachen und Hangwasser kann gelöste Stoffe aus Hanglagen an den Hangfuss oder in die Ebene verlagern. Kuppen und steile Oberhänge sind deshalb in der Regel Erosions- und Verarmungszonen, in denen sich der Boden oft nicht über das Stadium des Rohbodens hinaus entwickelt. Dagegen sind Hangfuss-, Mulden- und Tallagen Anreicherungs-zonen.» (Walthert et al., 2004).

Ein Problem bei der Ableitung eines Neigungstrends anhand der Profildaten, ist die Tatsache, dass in grossen Höhen auch auf schwach geneigten Hängen oder Ebenen Rohböden verbreitet vorkommen. Abbildung 16 macht deutlich, dass die Streuung der Bodenprofile bei allen Entwicklungsstufen sehr gross ist, da gerade der Grad der Vegetationsbedeckung einen enormen Einfluss auf die Erosionsanfälligkeit eines Standortes ausübt. Die Regressionsgerade bestätigt

aber trotzdem, wenn auch nur schwach, die Beziehung zwischen der Neigung und der Bodenentwicklung. Der Korrelationskoeffizient von 0,11 bleibt unter der kritischen 10-prozentigen Signifikanzschwelle von 0,179. Die Korrelation zwischen Neigung und Entwicklungsstufe ist damit bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % nicht signifikant.

Wenn man nun die beiden flachsten Gesteinsbodenstandorte (Profile N48: 27 % , N42: 36 % Hangneigung) nicht in die Analyse mit einbeziehen würde, würde der Korrelationskoeffizient (somit $R = 0,201$) die kritische Schwelle übersteigen und die Beziehung könnte als signifikant betrachtet werden. Dies ist nun aber statistisch nicht zulässig, da die Neigungswerte dieser beiden Standorte nach Bahrenberg (1999) nicht als Ausreisser angesehen werden können.

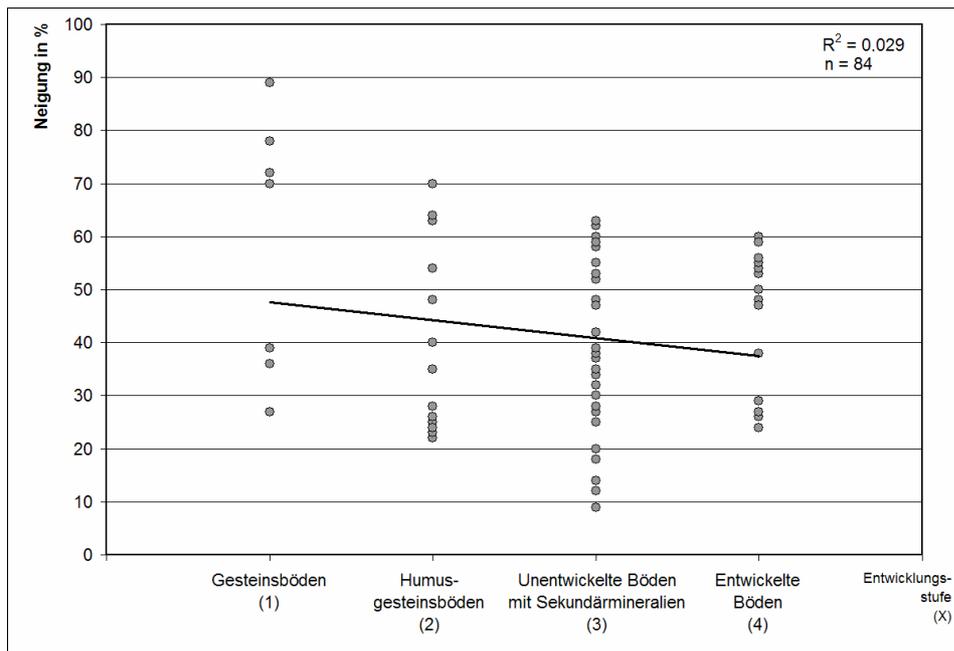


Abbildung 16: Lineare Korrelation zwischen Neigung und Entwicklungsstufe

Tabelle 10: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Neigung und Entwicklungsstufe

Anzahl Stichproben	84
Mittelwert \bar{m}	41
Standardabweichung s	15,34
Regressionsgerade	$y = -3,35x + 50,9$
Bestimmtheitsmass R^2	0,0121
Pearsonscher Korrelationskoeffizient R	0,110
Kritische Signifikanzschwelle bei $n = 84$ und $\alpha = 10\%$	0,179

3.3.3.4 Profile Curvature

Wie schon in Kapitel 3.2.3 beschrieben, ist die Profile Curvature ein Mass für die Krümmung der Geländeoberfläche in Fallrichtung. Die Annahme besteht darin, dass an konkaven Hanglagen durch die Akkumulation von Bodenmaterial prinzipiell tiefgründigere und mächtigere Böden entstehen als an konvexen Lagen. Auf Kuppen sind die Böden wegen langer Bodenfrostperioden und wegen geringer Sickerwassermengen flachgründiger als in Mulden (Turner & Blaser, 1977). Da die Klassifikation von Geländeformen immer in Bezug zum Massstab betrachtet werden muss, ist eine bodenkundlich relevante Ableitung von Geländeformen aus einem DHM sehr schwierig. Die hier verwendete Profile Curvature ist somit eine starke Ver-

einfachung der wirklichen Geländeformverhältnisse. Bei der Bildung der Regelbasis (siehe Kapitel 3.3.4.4) wurde diese Inputvariable daher am wenigsten stark gewichtet.

Da die Profile Curvature nicht im Feld bestimmt werden konnte, wurden die Krümmungswerte des DHMs an den Profilstandorten für eine Analyse verwendet. Der in Abbildung 17 gezeigte Trend deutet wie bei der Neigung ebenfalls in die richtige Richtung, ist jedoch nicht sehr ausgeprägt. Die Regressionsgerade verläuft von den negativen, konvexen Hangkrümmungswerten mit zunehmender Bodenentwicklung in Richtung der positiven, als konkav zu interpretierenden Krümmungswerte. Die grosse Streuung der Werte in allen Entwicklungsstufen und die Tatsache, dass die Stichprobenwerte aus dem DHM stammen, lässt auf einen grossen Unsicherheitsfaktor bezüglich des Entwicklungstrends schliessen. Es lässt sich somit auch nicht ausschliessen, dass dieser Trend zufällig zustande gekommen ist. Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient liegt bei 0,145, der kritische Schwellenwert bei einer 10-prozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit bei 0,180. Die Beziehung zwischen der Profile Curvature und der Bodenentwicklungsstufe kann somit anhand der 83 Profilstandorte nicht als signifikant beschrieben werden. Trotz dieser undeutlichen Korrelation wurde bei der Modellentwicklung davon ausgegangen, dass die Anfangs erwähnte Annahme tatsächlich besteht.

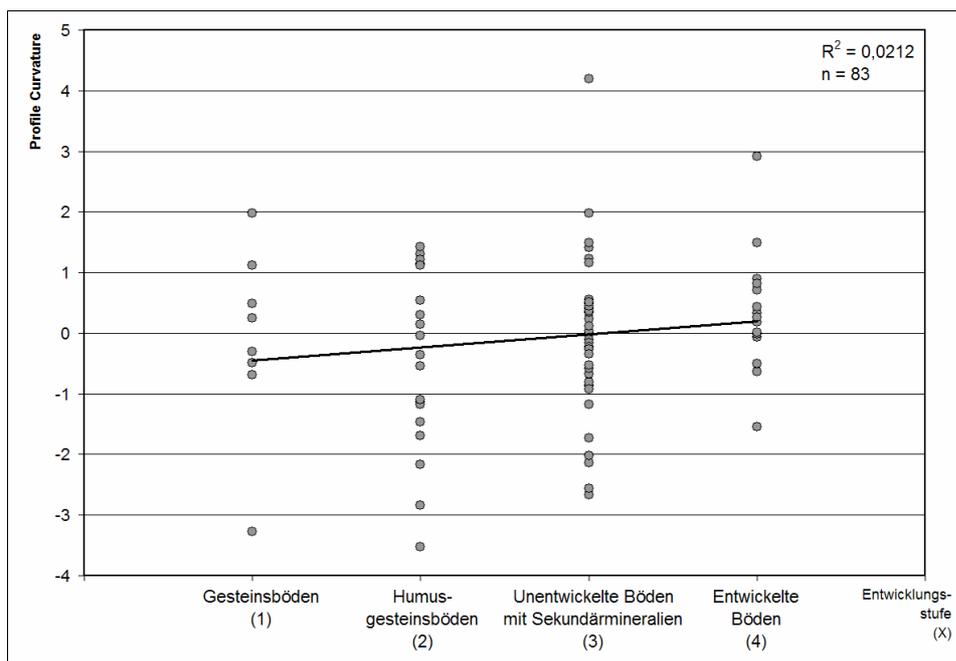


Abbildung 17: Lineare Korrelation zwischen Profile Curvature und Entwicklungsstufe (negative Werte = konvexe Krümmung, positive Werte = konkave Krümmung)

Tabelle 11: Statistische Kennwerte der Beziehung zwischen Profile Curvature und Entwicklungsstufe

Anzahl Stichproben	83
Mittelwert \bar{m}	-0,06632393
Standardabweichung s	1,29
Regressionsgerade	$y = 0,2159x - 0,6628$
Bestimmtheitsmass R^2	0,0212
Pearsonscher Korrelationskoeffizient R	0,145
Kritische Signifikanzschwelle bei $n = 83$ und $\alpha = 10\%$	0,180

3.3.4 Modul der Terrestrischen Böden

Im Folgenden wird der Aufbau des Moduls der Terrestrischen Böden beschrieben. Der Modulname ‚Terrestrische Böden‘ ist insofern nicht korrekt, da die separat modellierten Auengesteinsböden ebenfalls als terrestrische Böden gelten. Von den gesamthaft 14 modellierten Bodentypen werden 12 in diesem Modul berechnet, folglich stellt es den Schwerpunkt des ganzen Modells dar. Im Gegensatz zur Modellierung der Auengesteins- und Nassböden werden die terrestrischen Böden, wie nachfolgend beschrieben, mit Fuzzy-Logik berechnet. Die Grundlagen zur unscharfen Mathematik werden dazu in Kapitel 2.5 behandelt.

3.3.4.1 Modellierte Bodentypen

In Bezug auf den Modellaufbau werden in Tabelle 12 die in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Entwicklungsstufen und die dazugehörigen Bodentypen nochmals aufgelistet. Gesamthaft wurden 12 unterschiedliche Bodentypen modelliert. Der modellierte Bodentyp ‚Kein Boden‘ ist im eigentlichen Sinne nicht als Bodentyp zu verstehen. Da aber der Übergang von vegetationslosen Fels- und Schuttflächen (‚Kein Boden‘) zu spärlich bewachsenen Flächen mit initialer Bodenbildung (Gesteinsböden) in Wirklichkeit fließend verläuft, wurden die Flächen ohne Bodenbildung als Bodentyp ‚Kein Boden‘ in die Modellierung einbezogen.

Tabelle 12: Die modellierten Bodentypen des Moduls 'terrestrische Böden'

Geologisches Substrat	Entwicklungsstufen				
	0	1	2	3	4
silikatisch	Kein Boden	Silikat-gesteinsboden	Humus-Silikat-gesteinsboden	Ranker	Podsol und saure Braunerde
Gemischt silikatisch karbonatisch	Kein Boden	Misch-gesteinsboden	Humus-Misch-gesteinsboden	Regosol	Neutrale Braunerde
karbonatisch	Kein Boden	Karbonat-gesteinsboden	Humus-Karbonat-gesteinsboden	Rendzina	-

Bei normal perkolierten, entwickelten Böden auf silikatischem Substrat können im Untersuchungsgebiet sowohl Podsole als auch saure Braunerden entstehen. Eine Unterscheidung der beiden Bodentypen konnte nicht modelliert werden, da keine Daten zur Abbildung des Podsolierungsprozesses zur Verfügung stehen.

Dem geologischen Substrat kommt im Modell eine äusserst wichtige Rolle zu, da es die vorherrschende Bodenentwicklungsreihe definiert. So ist beispielsweise ein Vorkommen von neutralen Braunerden auf silikatischem Ausgangsgestein im Modell nicht möglich.

3.3.4.2 Modulaufbau

Bei der Modellierung mit Fuzzy-Logik können grundsätzlich drei Phasen unterschieden werden. In der Fuzzifikation werden die Werte der Inputdaten unscharfen Mengen zugeordnet (Kapitel 3.3.4.3). In einem zweiten Schritt, dem Inferenzprozess, werden die Modellregeln definiert und anschliessend auf die fuzzifizierten Inputdaten angewendet und entsprechend verarbeitet (Kapitel 3.3.4.4). In der Endphase, der Defuzzifikation, werden die Bodentypen schliesslich anhand der resultierenden Inferenzwerte berechnet (Kapitel 3.3.4.6).

Abbildung 18 verdeutlicht schematisch den internen Aufbau des Moduls. Da die ursprünglichen Datensätze der Geologischen Substratkarte und der primären Bodenbedeckungskarte

schon in klassierter Form vorlagen, konnten diese beiden Inputdatensätze nicht direkt in den Fuzzifizierungsprozess einfließen. Für eine Verarbeitung mit Fuzzy-Logik ist eine kontinuierliche Datenstruktur der Inputdaten notwendig, folglich konnten nur die Höhe, die Neigung und die Profile Curvature fuzzifiziert werden.

Das ‚Modul der terrestrischen Böden‘ besteht aus neun Submodulen, die eine Kombination der jeweiligen Substrat- und Bedeckungsklassen darstellen. Die erste Ziffer bei der Nummerierung der Submodule deutet auf das geologische Substrat hin, die zweite Ziffer definiert entsprechend die primäre Bodenbedeckung.

Die Zugehörigkeitsfunktionen bei der Fuzzifizierung der Inputdaten Höhe, Neigung und Profile Curvature wurde bei allen Submodulen auf die gleiche Weise definiert. Eine differenzierte, für jedes Modul angepasste Fuzzifizierung hätte sich als zu aufwändig erwiesen und ausserdem bei der Regelbildung keine Quervergleiche zugelassen. Für jedes Submodul wurde hingegen ein eigenes Regelwerk definiert, welches die jeweilige Kombination von Substrat und Bodenbedeckung berücksichtigte. Bei der Defuzzifikation wurde zwischen Karbonat-, Silikat- sowie Mischgesteins-Submodulen unterschieden. Dies war nötig, da bei den Karbonatgesteinen nur drei Bodentypen, bei den Silikat- und Mischgesteinen jedoch jeweils vier Bodentypen unterschieden werden.

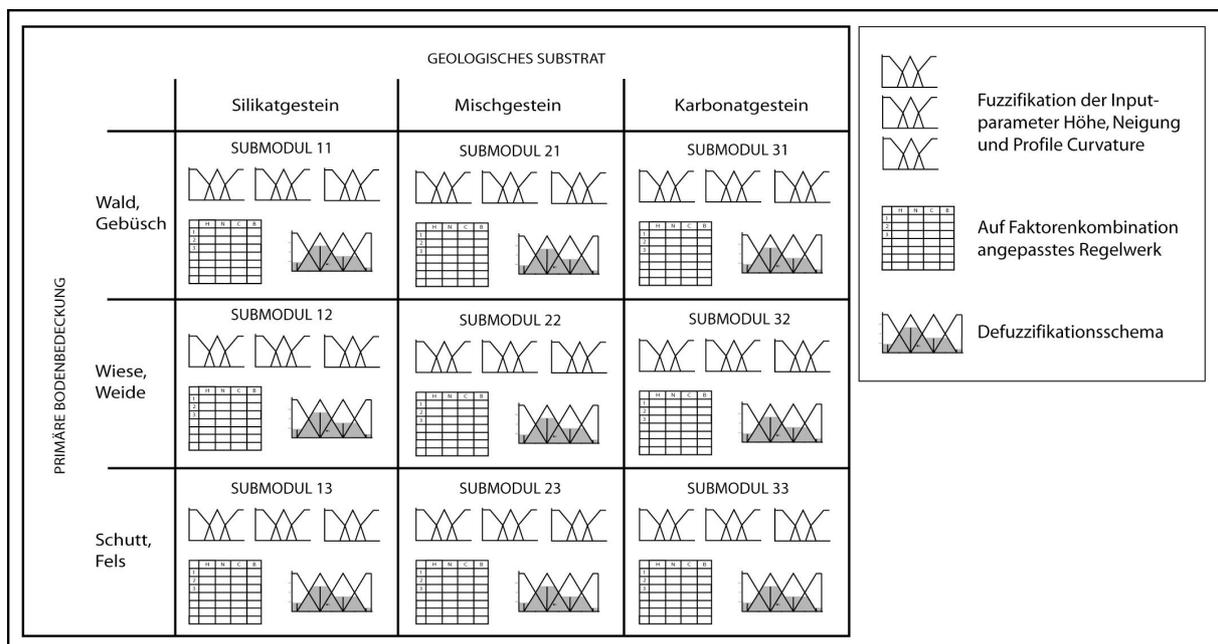


Abbildung 18: Submodule des Moduls 'terrestrische Böden'

3.3.4.3 Fuzzifizierung der Inputdatensätze

Die Fuzzifizierung ist die Umsetzung eines gegebenen Sachverhaltes in das Gerüst der unscharfen Mathematik. Werte werden unscharfen Mengen zugeordnet und die jeweiligen Zugehörigkeitsgrade zu diesen unscharfen Mengen bestimmt (Traeger, 1993). Dazu werden für jede unscharfe Klasse, auch linguistische Variable genannt, entsprechende Zugehörigkeitsfunktionen definiert, welche aus den Inputwerten einen Zugehörigkeitsgrad zur entsprechenden Klasse berechnen. Da sich alle Zugehörigkeitsfunktionen einer Inputvariablen in ihrem Wirkungsbereich vollständig überschneiden, wird ein Inputwert nach der Fuzzifikation durch mehrere Zugehörigkeitswerte ausgedrückt.

Bei allen drei Inputvariablen (Höhe, Neigung, Profile Curvature) wurden je drei unscharfe Klassen gebildet. Eine differenziertere Klassifikation in mehr als drei Klassen machte aufgrund der beschränkten Anzahl modellierbarer Bodentypen keinen Sinn. Viele der so generierten zusätzlichen Regeln würden sich vom Resultat her überschneiden. Es ist daher sinnvoller eine Klassifikation mit weniger Klassen zu verwenden, die kleinere Anzahl Regeln jedoch entsprechend sorgfältiger zu definieren.

Generell ist die Definition von unscharfen Klassen nicht immer einfach, vor allem, wenn nicht genügend Felddaten oder Erfahrungswerte zur Modellbildung zu Verfügung stehen. Die Form einer Zugehörigkeitsfunktion wird oft anhand von statistischen Kenngrößen der vorliegenden Felddaten definiert. Eine solche Herangehensweise war in diesem Fall aber aufgrund der schmalen Felddatenbasis nicht möglich. Darum wurden die folgenden Zugehörigkeitsfunktionen aufgrund von Literaturangaben, theoretischen Annahmen und visuellen Analysen definiert. Ein wesentlicher Vorteil der unscharfen Klassenbildung besteht darin, dass sich die Klassen in den Übergangszonen überschneiden, was einen gewissen Spielraum bei der Klassenbildung zulässt.

Zugehörigkeitsfunktionen können je nach Anwendung verschiedene Formen annehmen. Der Kurvenverlauf und die Steigung der Kurve sind im Allgemeinen vom Grad der Zugehörigkeit der Daten abhängig. Dabei ist prinzipiell jede stetige Funktion, welche die Zugehörigkeit beschreibt, möglich. Aus programmiertechnischen Gründen wurden im Folgenden nur lineare Zugehörigkeitsfunktionen verwendet.

Zugehörigkeitsfunktionen für die Inputvariable Höhe

Für diese Inputvariable wurden drei unscharfe Klassen TIEF, MITTELHOCH und HOCH gebildet. Abbildung 19 zeigt den Verlauf der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Höhe. Auf 2150 Meter, resp. 2450 Meter schneiden sich die Zugehörigkeitsfunktionen. An diesen so genannten *Crossoverpoints* ist die Zugehörigkeit beider Klassen jeweils 50 Prozent.

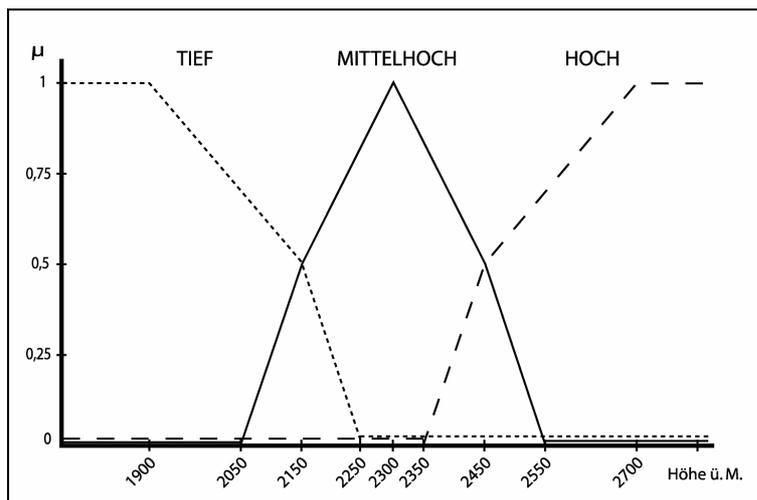


Abbildung 19: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Höhe

Die Zugehörigkeitsfunktionen wurden mit Hilfe der Waldgrenzhöhe im Nationalpark definiert. Unter der Waldgrenze versteht man im weitesten Sinne den Übergangsbereich von der subalpinen Stufe in die alpine Höhenstufe. Der Grenzbereich selber ist von heterogener Natur und kann je nach Standort stark variieren. Er kann als scharfe Linie in die baumlose alpine

Zone übergehen oder sich allmählich von einem geschlossenen Bestand über isolierte Baumgruppen auflösen (Tranquillini, 1979).

Dabei wurde von der Klasse MITTELHOCH ausgegangen, welche den ganzen Waldgrenzbereich abdecken sollte. Dieser erstreckt sich gemäss Sieber (Sieber, 2000) von der unteren Waldgrenze auf ca. 2150 Meter bis zur Krummholzgrenze auf ungefähr 2450 Meter über Meer. Dieser Höhenbereich soll dabei in die Kernzone (Zugehörigkeit > 50 %) der Klasse MITTELHOCH zu liegen kommen. Unterhalb 2150 Meter schliesst die Kernzone der Klasse TIEF an, die bei 1900 Metern eine Zugehörigkeit von 100 % erreicht. Die Kernzone der Klasse HOCH reicht von 2450 m bis zu den höchsten Gipfeln auf 3175 Meter. Ab 2700 Meter erreicht die Klasse HOCH die 100%ige Zugehörigkeit.

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse TIEF $\mu_T(h)$, mit h = Höhe (m ü. M.):

$$\mu_T(h) = \begin{cases} 1 & \text{für } h \leq 1900 \\ -0.002 h + 4.8 & \text{für } 1900 < h < 2150 \\ -0.005 h + 11.25 & \text{für } 2150 \leq h < 2250 \\ 0 & \text{für } h \geq 2250 \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse MITTELHOCH $\mu_{MH}(h)$, mit h = Höhe (m ü. M.):

$$\mu_{MH}(h) = \begin{cases} 0 & \text{für } h \leq 1900 \\ 0.005 h - 10.25 & \text{für } 1900 < h < 2050 \\ 0.0033 h - 6.666 & \text{für } 2050 \leq h < 2150 \\ -0.0033 h + 8.666 & \text{für } 2150 \leq h < 2300 \\ -0.0033 h + 8.166 & \text{für } 2300 \leq h < 2450 \\ 0 & \text{für } h \geq 2450 \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse HOCH $\mu_H(h)$, mit h = Höhe (m ü. M.):

$$\mu_H(h) = \begin{cases} 0 & \text{für } h \leq 2350 \\ 0.005 h - 11.75 & \text{für } 2350 < h < 2450 \\ 0.002 h - 4.4 & \text{für } 2450 \leq h < 2700 \\ 1 & \text{für } h \geq 2700 \end{cases}$$

Stellvertretend für alle Inputvariablen zeigen die drei Kartenausschnitte der Abbildung 20 die Zugehörigkeitsgrade der Klassen TIEF, MITTELHOCH und HOCH im Gebiet des Val Minger. Aus jedem Höhenwert einer Rasterzelle werden somit jeweils die drei Zugehörigkeitsgrade $\mu_T(h)$, $\mu_{MH}(h)$, $\mu_H(h)$ ermittelt.

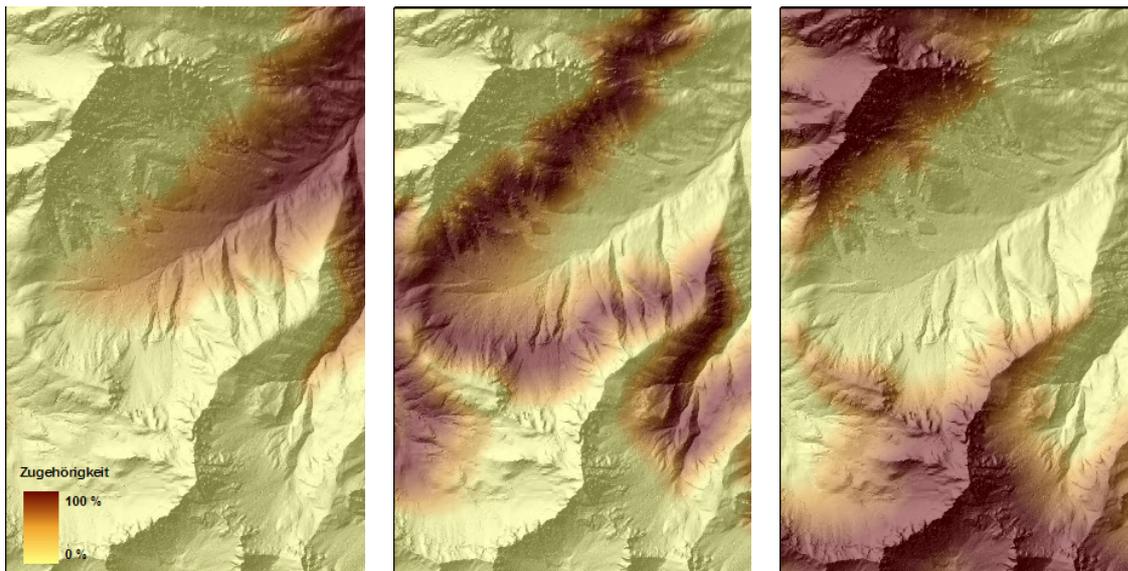


Abbildung 20: Zugehörigkeitsgrade der drei unscharfen Höhenklassen TIEF, MITTELHOCH und HOCH im Gebiet des Val Minger

Zugehörigkeitsfunktionen für die Inputvariable Neigung

Bei der Neigung wurden ebenfalls drei unscharfe Klassen FLACH, MITTELSTEIL und STEIL gebildet. Abbildung 21 zeigt den Verlauf der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Neigung.

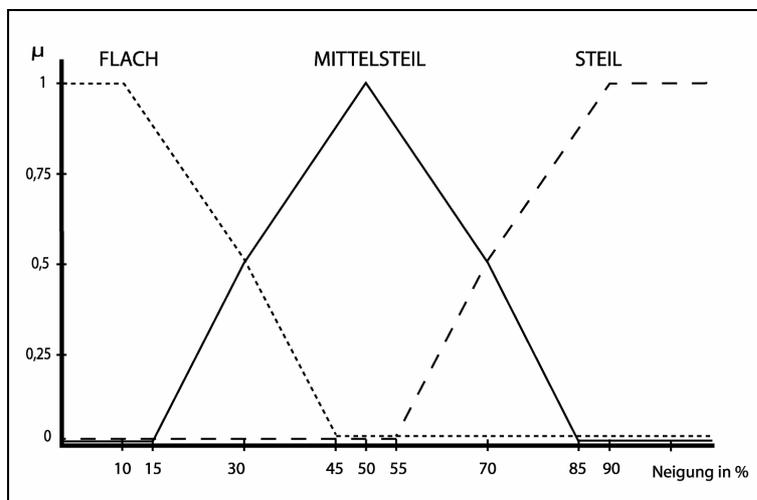


Abbildung 21: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Neigung

Die Bestimmung der unscharfen Klassen wurde anhand der Neigungsklassen der FAL (Brunner, 1997) vorgenommen. Diese unterscheidet folgende vier Neigungsbereiche:

Tabelle 13: Neigungsklassen gemäss FAL

Flachhang	5- 25 %
Starkhang	25 – 50 %
Steilhang	50 – 75 %
Extremer Steilhang	> 75 %

Bei der Definierung wurde von der Klasse MITTELSTEIL ausgegangen. Ihre maximale Zugehörigkeit wurde bei 50 % Neigung, also an der Grenze von Starkhang zu Steilhang definiert. Die Kernzone von STEIL deckt sich ungefähr mit der FAL-Klasse *Extremer Steilhang*, die Kernzone von FLACH analog dazu mit der Klasse *Flachhang*. Die Bestimmung der drei unscharfen Neigungsklassen war insofern problematisch, da praktisch keine Literatur zur Auswirkung der Neigung auf Bodeneigenschaften gefunden werden konnte.

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse FLACH $\mu_F(n)$, mit n = Neigung (in %):

$$\mu_F(n) = \begin{cases} 1 & \text{für } n \leq 10 \\ -0.025 n + 1.25 & \text{für } 10 < n < 30 \\ -0.333 n + 1.5 & \text{für } 30 \leq n < 45 \\ 0 & \text{für } n \geq 45 \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse MITTELSTEIL $\mu_{MS}(n)$, mit n = Neigung (in %):

$$\mu_{MS}(n) = \begin{cases} 0 & \text{für } n \leq 15 \\ 0.0166 n - 0.25 & \text{für } 15 < n < 30 \\ 0.025 n - 0.25 & \text{für } 30 \leq n < 50 \\ -0.025 n + 2.25 & \text{für } 50 \leq n < 70 \\ -0.033 n + 2.833 & \text{für } 70 \leq n < 85 \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse STEIL $\mu_S(n)$, mit n = Neigung (in %):

$$\mu_S(n) = \begin{cases} 0 & \text{für } n \leq 55 \\ 0.0033 n - 1.833 & \text{für } 55 < n < 70 \\ 0.025 n - 1.25 & \text{für } 70 \leq n < 90 \\ 1 & \text{für } n \geq 90 \end{cases}$$

Zugehörigkeitsfunktionen für die Inputvariable Profile Curvature

Bei der Profile Curvature wurden drei unscharfe Klassen KONVEX, GERADE und KONKAV gebildet. Abbildung 22 verdeutlicht den Verlauf der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Profile Curvature. Die Klasse KONKAV repräsentiert Akkumulationslagen wie Mulden, Rinnen und Hangfüsse, die Klasse GERADE schwache Akkumulations- und Erosionslagen, in denen keine oder nur langsam verlaufende Verlagerungsprozesse stattfinden, schliesslich die Klasse KONVEX, welche potentielle Erosionslagen wie Kuppen und Hangkanten abbildet.

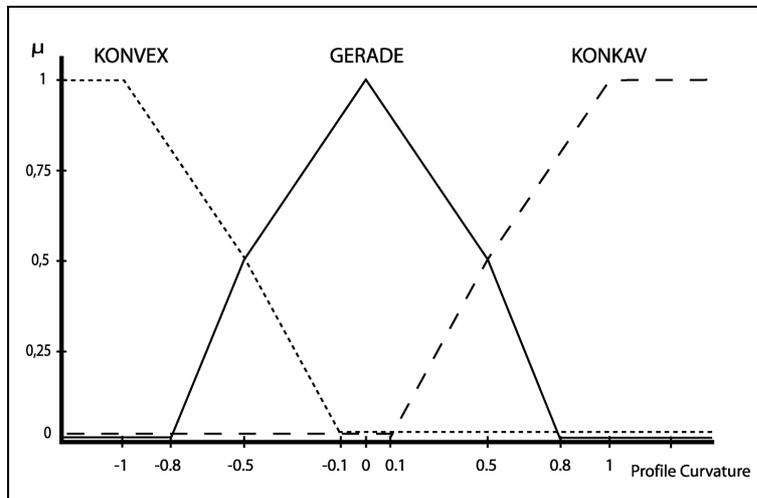


Abbildung 22: Die Fuzzifikationsfunktionen der Variablen Profile Curvature

Die Definierung der drei Klassen basierte auf den Erfahrungen aus der Bodenmodellierung im Oberengadin (Margreth, 2004). Dort wurden die Geländeformen nach Denoth (1997) mit Klassengrenzwerten von -0.2 und 0.2 verwendet. Aufgrund diverser Versuche mit verschiedenen Grenzwerten an den Crossoverpoints und anschliessender visueller Analyse im GIS, wurden die Grenzen an diesen Stellen bei -0.5 und 0.5 definiert.

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse KONVEX $\mu_{KV}(p)$, mit p = Profile Curvature-Wert:

$$\mu_{KV}(p) = \begin{cases} 1 & \text{für } p \leq -1 \\ -p & \text{für } -1 < p < -0.5 \\ -1.25p - 0.125 & \text{für } -0.5 \leq p < -0.1 \\ 0 & \text{für } -0.1 \leq p \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse GERADE $\mu_G(p)$, mit p = Profile Curvature-Wert:

$$\mu_G(p) = \begin{cases} 0 & \text{für } p \leq -0.8 \\ 1.666p + 1.333 & \text{für } -0.8 < p < -0.5 \\ p + 1 & \text{für } -0.5 \leq p < 0 \\ -p + 1 & \text{für } 0 \leq p < 0.5 \\ -1.666p + 1.333 & \text{für } 0.5 \leq p < 0.8 \end{cases}$$

Die Zugehörigkeitsfunktion der Klasse KONKAV $\mu_{\text{KK}}(p)$, mit p = Profile Curvature-Wert:

$$\mu_{\text{KK}}(p) = \begin{cases} 0 & \text{für } p \leq 0. \\ 1.25 p - 0.125 & \text{für } 0.1 < p < 0.5 \\ p & \text{für } 0.5 \leq p < 1 \\ 1 & \text{für } 1 \leq p \end{cases}$$

Es ist anzumerken, dass bei der AML-Programmierung nicht direkt die oben aufgeführten Funktionen implementiert wurden, sondern eine allgemeine 2-Punkteform der Geradengleichungen. Die Funktionen konnten somit über die jeweiligen Knickpunkte definiert werden, was eine bequeme Anpassung und Änderung der Funktionen ermöglichte.

3.3.4.4 Bildung der Regelbasis

Die Integration und Verarbeitung des bodenkundlichen Wissens im Modell erfolgte über ein regelbasiertes System. Dieses besteht einerseits aus Inferenzregeln (Modellregelbasis), andererseits aus einem Inferenzschema, das die Verarbeitungsvorschriften enthält, nach welchen die fuzzifizierte Eingangsgrößen mit Hilfe der Inferenzregeln verarbeitet werden (Kahlert, 1993). Die Inferenzregeln bilden sozusagen den inhaltlichen Kern des Modells, denn darin werden die Inputvariablen mit den einzelnen Bodentypen verknüpft. Ein wesentlicher Vorteil bei der Anwendung von Fuzzy-Logik besteht darin, dass die Regeln auf der Basis von linguistischen Variablen, also den unscharfen Klassen, definiert werden können. Dies erlaubt es, die bodenkundlichen Erfahrungen und das Wissen nachvollziehbarer in die Modellierung einfließen zu lassen.

Die einzelnen Regeln bestehen aus einem Bedingungsteil (Prämissen) und einem Schlussfolgerungsteil (Konklusion). Die einzelnen Prämissen (linguistischen Variablen) einer Regel werden miteinander über einen UND-Operator kombiniert und dann einem Bodentypen zugeordnet. Für die neun bestehenden Submodule wurde je eine Regelbasis von 27 Regeln geschaffen. Im Gesamten wurden somit 243 Regeln definiert, welche jegliche Kombination aller Inputdatenklassen berücksichtigt.

Am Beispiel des Regelwerkes von Submodul 32 (Wiese/Weide auf karbonatischem Substrat) soll die Erstellung der Regeln stellvertretend für alle anderen Submodule aufgezeigt werden (vgl. Tabelle 14). In einem ersten Schritt wurden die 27 Regeln gemäss den theoretischen Annahmen aus Kapitel 3.3.3 und den im Feld gemachten Erfahrungen definiert. In einem zweiten Schritt erfolgte eine Verfeinerung und Anpassung der Regeln auf der Basis der vorhandenen Bodenprofile. Dazu wurden die Bodenprofile den unscharfen Klassen zugeordnet, wobei ein Zugehörigkeitsgrad grösser als 25 % als Klassengrenze diente. Anschliessend wurden die daraus resultierenden Häufigkeitsverteilungen für jedes Submodul dargestellt.

Aus Abbildung 23 wird ersichtlich, dass bei den Klassen TIEF und MTTELHOCH mit einer Ausnahme nur Humuskarbonatgesteinsböden und Rendzinen vorkommen, während bei der Klasse HOCH die Karbonatgesteinsböden vorherrschen. Auch bei der Variablen Neigung ist eine ähnliche Tendenz festzustellen (vgl. Abbildung 24). In den Klassen FLACH und MITTELSTEIL kommen vor allem Humuskarbonatgesteinsböden und Rendzinen vor, wobei die Anzahl Rendzinen mit zunehmender Höhe abnimmt. In der Klasse STEIL fehlen die

Rendzinen gänzlich, es muss jedoch berücksichtigt werden, dass nur zwei Profile als Datengrundlage zur Verfügung stehen.

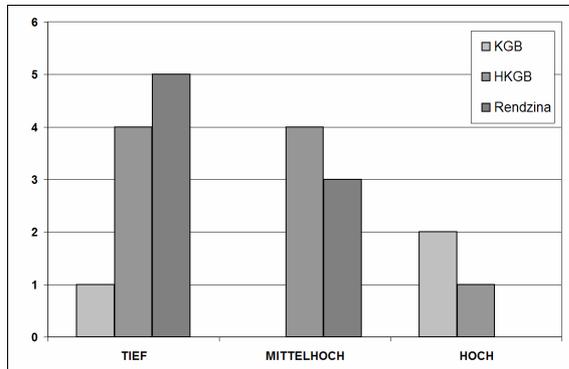


Abbildung 23: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Höhenklassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden)

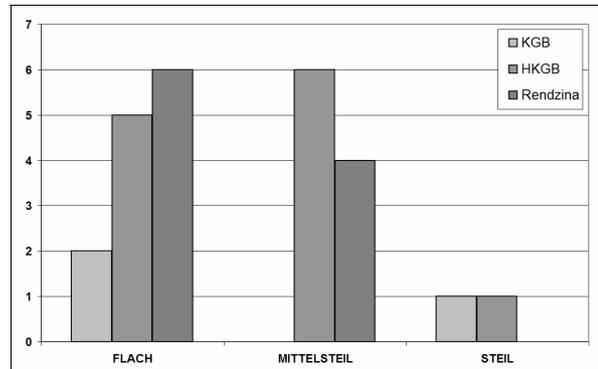


Abbildung 24: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Neigungsklassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden)

Abbildung 25 zeigt schliesslich die Häufigkeitsverteilung der Bodenprofile in Submodul 32 nach den Profile Curvature Klassen. In der Klasse GERADE kommen alle Bodentypen vor, während an konkaven Lagen mehrheitlich Humuskarbonatgesteinböden und Rendzinen zu finden sind. Bei der Klasse KONVEX finden sich entgegen den theoretischen Annahmen aus Kapitel 3.3.3 ebenfalls mehrheitlich Karbonatgesteinsböden und Rendzinen. Dies ist aber wohl damit zu begründen, dass auch in tiefen Lagen an konvexen Standorten durchaus entwickelte Böden vorherrschen, und dass die Profile Curvature nicht im Feld bestimmt wurde, sondern aus dem DHM ableitet wurde.

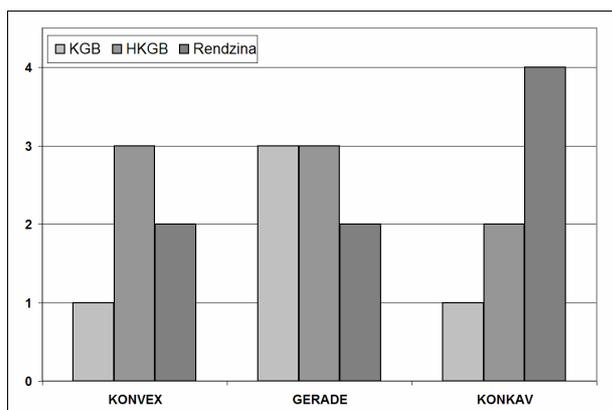


Abbildung 25: Bodenprofilhäufigkeiten der unscharfen Profile Curvature Klassen (KGB = Karbonatgesteinsboden und HKGB = Humus-Karbonatgesteinsboden)

Aufgrund der beschränkten Anzahl Profile und der damit verbundenen Tatsache, dass nur eine Inputvariable berücksichtigt werden konnte, müssen diese Aussagen entsprechend vorsichtig interpretiert werden, und wurden deshalb nur als Tendenzen in der Regelbildung berücksichtigt. Die auf der Basis einer „qualified Guess“ definierten Regeln wurden mit Hilfe dieser Aussagen überprüft und entsprechend angepasst.

Tabelle 14: Regelbasis für die Standortkombination Wiese/Weide auf karbonatischem Substrat

REGELNR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	RENDZINA
2	TIEF	FLACH	GERADE	RENDZINA
3	TIEF	FLACH	KONVEX	RENDZINA
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	RENDZINA
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
7	TIEF	STEIL	KONKAV	RENDZINA
8	TIEF	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
9	TIEF	STEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	RENDZINA
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	RENDZINA
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
20	HOCH	FLACH	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	KARBONATGESTEINSBODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN

3.3.4.5 Inferenzprozess

Bei der Inferenz werden vorher definierte Regeln auf die in der Fuzzifizierung ermittelten Zugehörigkeitsgrade angewandt. Am Ende dieser Operation stehen wieder Zugehörigkeitsgrade, nämlich jene der Ergebnismengen der Ausgangsgrößen (Traeger, 1993). Abbildung 26 verdeutlicht schematisch den Inferenzprozess am Beispiel von vier Regeln, die den Bodentypen Rendzina repräsentieren. Nach der Fuzzifizierung wird jeder Standort (Rasterzelle) durch je drei Zugehörigkeitsgrade der drei Inputvariablen Höhe, Neigung und Profile Curvature charakterisiert. In einem ersten Schritt wird für jede Regel der kleinste Zugehörigkeitsgrad der Inputvariablen ermittelt. Danach bestimmt man das Maximum der vorher ermittelten Minimalwerte innerhalb aller Regeln eines Bodentypen. Für jeden Bodentypen wird auf diese Weise genau eine Regel aktiviert (in Abbildung 26 die Regel 3 für den Bodentyp Rendzina). Deren Minimalwert $\mu_F (= g_{\text{Rendzina}})$ fließt als ‚Rendzina-Gewichtungsfaktor‘ in die Defuzzifizierung ein. Die Regel 3 im Beispiel charakterisiert (im Gegensatz zu den anderen Regeln 1, 2 und 4) die Kombination der Standortfaktoren (Standort) am zutreffendsten. Analog dazu werden auch die Gewichtungsfaktoren (g_{HKGB} , g_{KGB} , g_{KB}) der anderen Bodentypen mit diesem Minimum-Maximum-Filter ermittelt.

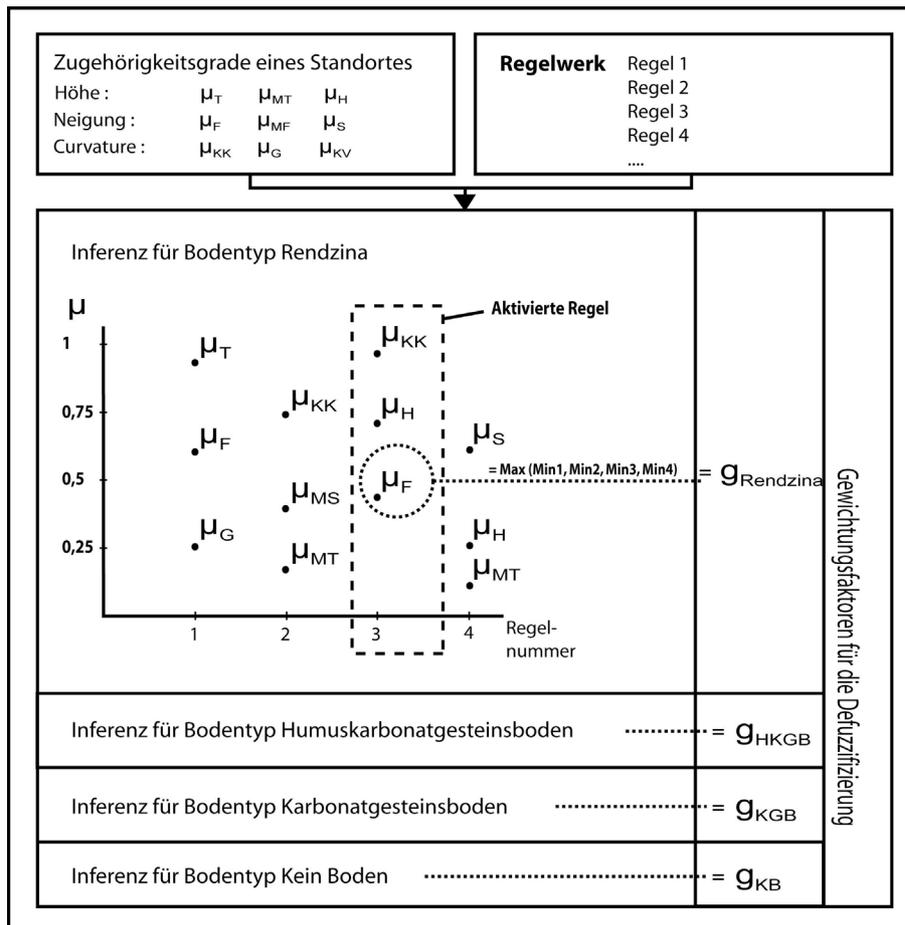


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Inferenzprozesses am Beispiel des Bodentyps Rendzina (bezogen auf eine spezifische Rasterzelle)

3.3.4.6 Defuzzifikation

Die Defuzzifikation stellt sozusagen die Umkehr der Fuzzifizierung dar. Ein durch mehrere Werte ausgedrückter unscharfer Sachverhalt wird dabei wieder in ein konkretes Resultat oder einen resultierenden Wert umgewandelt. Dazu werden für jeden Bodentypen stetige, lineare Defuzzifikationsfunktionen definiert. Da die Übergänge zwischen den Bodentypen einer Bodenentwicklungsreihe in der Natur fließend sind, wurden auch die Funktionen mit grossem Überschneidungsbereich definiert. Die Überschneidung wurde so gewählt, dass bei maximaler Zugehörigkeit zu einem Bodentypen ($\mu = 1$), die anderen Zugehörigkeiten entsprechend minimal ($\mu = 0$) ausfallen (vgl. Abbildung 27).

Um die bei der Inferenz entstandenen unscharfen Ergebnismengen in konkrete Anweisungen umzusetzen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die teilweise leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern (Traeger, 1993). In dieser Arbeit wurde die Schwerpunktmethodik angewendet, da diese gemäss Bandemer (1993) im Allgemeinen die besten Resultate liefert und somit auch die mit Abstand am häufigsten angewandte Defuzzifizierungsmethode darstellt. Mittels der im Inferenzprozess ermittelten Gewichtungsfaktoren (siehe Kapitel 0) und den Defuzzifikationsfunktionen wird eine Fläche ermittelt, aus dessen Schwerpunkt sich das Endresultat bestimmen lässt. Die resultierenden Bodentypzugehörigkeiten lassen sich schliesslich mit dem x-Wert des Schwerpunktes (x_s) über die Defuzzifikationsfunktionen berechnen. Abbildung 27 zeigt die Defuzzifikation am Beispiel der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe. Aus den vier Gewichtungsfaktoren resultiert die grau dargestellte Fläche mit ihrem

Schwerpunkt S . Dieser dient als Wert zur Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade der jeweiligen Bodentypen. Diese Zugehörigkeitsgrade werden so für jede Rasterzelle mittels dieser Schwerpunktmethodik einzeln berechnet.

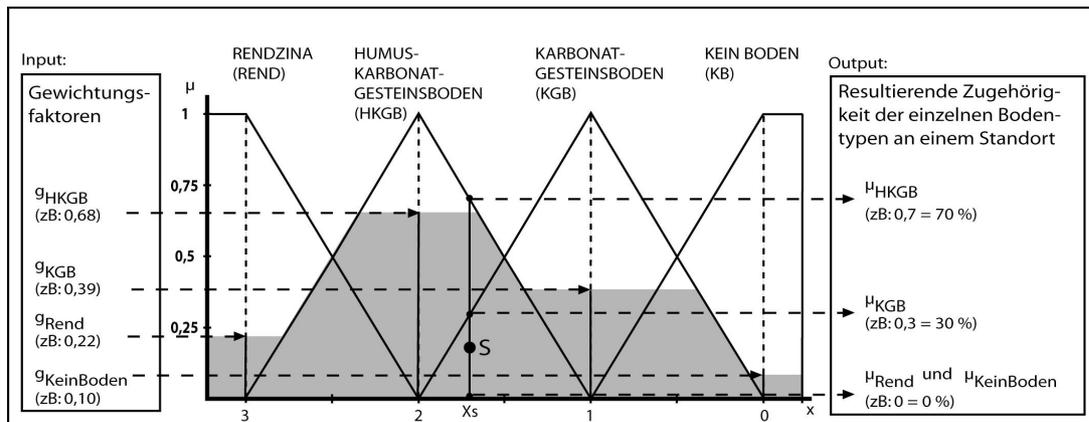


Abbildung 27: Defuzzifikationsschema am Beispiel der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe

Ein grosser Vorteil dieser Methodik ist, dass nicht nur eine Regel das Endresultat definiert, sondern mehrere Regeln, welche mit unterschiedlicher Gewichtung das Endresultat beeinflussen. Wenn nun ein Gewichtungsfaktor im Vergleich zu den anderen sehr gross ist, wird dieser natürlich den entscheidenden Ausschlag für den resultierenden Bodentypen geben. Im Übergangsbereich zwischen zwei Bodentypen, also dort, wo sich die Funktionen schneiden, spielen alle Gewichtungsfaktoren allerdings eine grosse Rolle.

Bei der Modellierung der gemischt silikatisch-karbonatischen und silikatischen Bodenentwicklungsreihen werden nicht nur vier sondern fünf verschiedene Bodentypen unterschieden, was zu einer entsprechenden Erweiterung des Defuzzifikationsschema führt (siehe Abbildung 28).

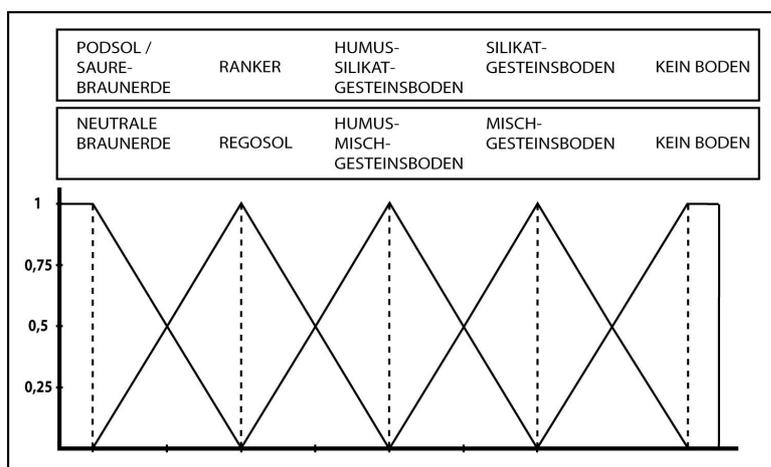


Abbildung 28: Defuzzifikation der silikatischen und gemischten Bodenentwicklungsreihen

Die Wahl der Funktionsgrenzpunkte und Schnittpunkte (Crossoverpoints) entscheidet zusätzlich zu den einzelnen Gewichtungsfaktoren im Wesentlichen über die entsprechende Zugehörigkeit zu einem Bodentypen. Darum wurde die Form sämtlicher Funktionen gleichmässig definiert. Ein Nachteil der Defuzzifikation mit der Schwerpunktmethodik besteht darin, dass

100-prozentige Zugehörigkeiten zu den ‚Entwickelten Böden‘ und ‚Kein Boden‘ nur sehr selten auftreten können, da der Schwerpunkt prinzipiell nicht im Randbereich des Defuzzifikationsschemas zu liegen kommen kann. Anhand von Validierungsergebnissen wurden die Funktionen daher entsprechend angepasst. So wurden beispielsweise die beiden äusseren Crossoverpoints etwas in Richtung Mitte des Defuzzifikationsschema verschoben, um die Gewichtung der ‚Entwickelten Böden‘ und ‚Kein Boden‘ zu erhöhen.

3.3.5 Modul der Auengesteinsböden

In diesem Kapitel soll die Modellmethodik der Auengesteinsböden beschrieben werden. Eine allgemeine Modellierung von Auenböden ist mit den vorhandenen GIS-Datengrundlagen nicht möglich, daher beschränkt sich die Modellierung auf die Auengesteinsböden. Es sind fluvial geprägte, unentwickelte Böden, welche auf Fluss- und Seesedimenten entstehen. Die periodischen Überschwemmungen verhindern einen lückenlosen Pflanzenbewuchs (vgl. Kapitel 2.3.4).

Die Modellierung dieses Moduls basiert auf einer einfachen Verschneidung von scharfen Klassen. Auf die Verwendung eines Fuzzy-theoretischen Ansatzes wurde aus zeitlichen Gründen verzichtet. Die im Vergleich zu anderen Bodentypen untergeordnete Rolle der Auengesteinsböden im Untersuchungsgebiet hätte eine aufwändig zu realisierende Modellierung mit unscharfen Klassen nicht gerechtfertigt.

Innerhalb des Kartenperimeters der geomorphologischen Kartierung basiert das Modul auf einer Verfeinerung der kartierten Schwemmfächer und Alluvialebenen. Dazu wurden zwei Regeln gebildet, die als einfache Wenn-Dann-Bedingungen implementiert wurden:

Tabelle 15: Modellregeln der Auengesteinsböden

Bedingungsteil			Schlussfolgerung
Geomorphologie = Schwemmfächer	Neigung 25 %	Bodenbedeckung = Schutt/Geröll	Bodentyp = Auengesteinsboden
Geomorphologie = Alluvionen	Neigung 25 %	Bodenbedeckung = Schutt/Geröll	Bodentyp = Auengesteinsboden

Im Prinzip hätte eine Verschneidung von Schwemmfächern und Alluvionen mit den Geröllflächen der primären Bodenbedeckung für die Ausscheidung der Auengesteinsböden gereicht. Der Einbezug der Neigung wurde deshalb nötig, da die räumliche Genauigkeit der geomorphologischen Karte stellenweise ungenügend ist. Die blauen Flächen in Abbildung 29 zeigen die Schwemmfächer und Alluvionen im Gebiet von Buffalora und verdeutlichen die räumlichen Ungenauigkeiten dieser kartierten Elemente.

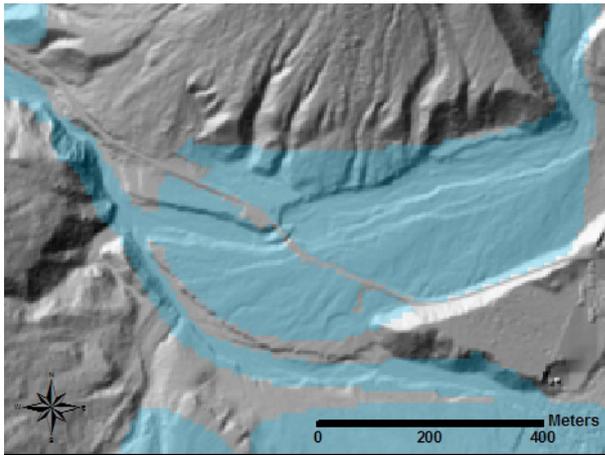


Abbildung 29: Räumliche Ungenauigkeiten der geomorphologischen Kartierung. Blau dargestellt sind die Alluvionen und Schwemmfächer im Gebiet von Buffalora

Auf Flächen des Untersuchungsgebietes, welche die geomorphologische Karte nicht abdeckt, wurden die Auengesteinsböden mit einem Pufferbereich der Fliessgewässer, der Neigung und der Bodenbedeckung abgeschätzt. Aus einer visuellen Analyse ging hervor, dass ein Pufferbereich mit 80 Metern Durchmesser die alluvial geprägten Geröllflächen gut abdeckt. Die Grenzneigung wurde aus Konsistenzgründen ebenfalls auf 25 % gesetzt.

Tabelle 16: Ergänzende Modellregel der Auengesteinsböden

Bedingungsteil			Schlussfolgerung
Fliessgewässerabstand 40 Meter	Neigung 25 %	Bodenbedeckung = Schutt/Geröll	Bodentyp = Auengesteinsboden

Es stellte sich die Frage, ob eine allfällige Verfeinerung der Auengesteinsböden nach den geologischen Substraten in Auenkarbonatgesteinsböden, Auensilikatgesteinsböden und Auenmischgesteinsböden möglich wäre. Eine Abschätzung über den geologischen Substrattypen innerhalb des Einflussbereiches von Fliessgewässern ist im Allgemeinen aber sehr schwierig, da alpine Fliessgewässer allgemein ein hohes Verlagerungspotential von Feststoffen besitzen. Daher wäre eine Abschätzung des geologischen Substrates auf alluvial geprägten Flächen auf Basis der geologischen Karte nicht sinnvoll.

3.3.6 Modul Nassböden

Bei Nassböden unterscheidet man generell zwischen mineralischen und organischen Nassböden. Zu den Mineralischen zählt man die Gleye und Pseudogleye, welche durch Hang-Grund- oder Stauwasser geprägt werden. Die organischen Nassböden bestehen aus Mooren und Halbmooren (vgl. Kapitel 2.3.4).

Die mineralischen Nassböden (Gleye) lassen sich oft nicht eindeutig kartieren, da die Vergleyung nicht über die Vegetation abgeschätzt werden kann und deren Vorkommen stark von den hydrologischen Eigenschaften am Standort abhängen. Eine getrennte Modellierung von mineralischen und organischen Nassböden war somit mit den vorhandenen Datengrundlagen nicht realisierbar. Die Verbreitung der Nassböden ist im Verhältnis zu den normal perkolierten, terrestrischen Böden im Untersuchungsgebiet sehr gering. Dies ist hauptsächlich

auf die geologischen und klimatischen Gegebenheiten des Gebietes zurückzuführen (Zoller, 1995). Auf karbonatischem Ausgangsgestein ist die Wasserdurchlässigkeit bekanntlich sehr gut, die Bildung von Nassböden ist somit relativ unwahrscheinlich. Die verhältnismässig geringen Niederschläge und der daraus resultierende Abfluss ist ein weiterer Grund für deren beschränkte Verbreitung im Untersuchungsgebiet. Aufgrund dessen wurde, wie bei den Augengesteinsböden auf einen Fuzzy-theoretischen Ansatz verzichtet, da ein solcher Modellansatz und dessen Implementierung sehr aufwändig wären.

Bei der primären Bodenbedeckung von Vector25 (Swisstopo, 2004) werden die hydromorphen Standorte als Sümpfe klassiert. Oft handelt es sich dabei um Moore oder Halbmoore, die anhand der Moorvegetationsgesellschaften und der Topographie kartiert werden konnten.

Analog dazu wurden bei der Vegetationskartierung (Zoller, 1992) vernässte Standorte sowie Flach- und Gehängemoore kartiert. Diese Flächen können also mit grosser Sicherheit als Nassbodenstandorte angesprochen werden:

Tabelle 17: Modellregeln der Nassböden

Bedingungsteil	Schlussfolgerung
Primäre Bodenbedeckung = Sumpf & Sumpf im Wald	Bodentyp = Nassboden
Vegetationskartierung (Zoller, 1995) = Vernässungen	Bodentyp = Nassboden

Die Sumpfgebiete der primären Bodenbedeckung und die Vernässungen der Vegetationskartierung vernachlässigen die Verhältnisse entlang von Bächen und Flüssen. An diesen Stellen sind unter Umständen ebenfalls Nassböden zu finden. Dazu wurde folgende zusätzliche Regel zur Abschätzung der Nassbodenstandorte entwickelt:

Tabelle 18: Ergänzende Modellregel der Nassböden

Bedingungsteil			Schlussfolgerung
Geologisches Substrat = Silikatgestein	Bodenbedeckung = Wald/Gebüsch oder Wiesen/Weiden	Neigung 50 %	Bodentyp = Nassboden
Flowaccumulation > 300 (30'000 m ²)	Profile Curvature > 0,3 (konkave Krümmung)		

Mit wenigen Ausnahmen befinden sich sämtliche vernässten und sumpfigen Standorte der Kartierungen auf silikatischem Ausgangsgestein. Es wird daher davon ausgegangen, dass nur auf silikatischen Substraten in Kombination mit vegetationsbedeckten Standorten Nassböden zu finden sind. Eine weitere Bedingung stellt die hydrologische Einzugsgebietsgrösse dar, welche grösser als 30'000 m² betragen muss. Dieser Grenzwert entspricht einer quadratischen Fläche von 175 x 175 Metern. Die letzte Bedingung ergab sich aus der Kombination der Neigung und der Profile Curvature. Es wird dabei angenommen, dass nur in Mulden, Hangfusslagen und an konkav gekrümmten Hängen mit einer maximalen Hangneigung von 50 % Nassböden vorkommen können.

Der verwendete Modellansatz in diesem Modul ist sehr einfach aufgebaut und hat in dieser Form nur provisorischen Charakter. Für eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Modellierung von hydromorphen Böden müsste sicherlich ein niederschlagsreicheres Gebiet gewählt werden, von dem detailliertes hydrologisches Wissen und die entsprechenden Datengrundlagen (z.B. hydrologische Karten) vorhanden wären.

3.3.7 Validierungsprozess

Generell werden bei Validierungsprozessen die Resultate eines Experimentes oder eines Modells auf ihre Gültigkeit hin überprüft. Die dabei angewandten Verfahren zur Verifikation von Resultaten können je nach Themengebiet und Versuchsanordnung sehr unterschiedlich sein. Die im Folgenden beschriebene Modellvalidierung beschränkt sich auf die hypothetische Bodentypenkarte. Die anderen modellierten Bodeneigenschaften, wie pH-Wert und Bodenmächtigkeit konnten aufgrund der angewendeten Modellmethodik nicht validiert werden (vgl. Kapitel 4.4).

Der gesamte Validierungsprozess stellt ein iteratives Verfahren zur Verbesserung der Modellierung dar, wie es auch von Margreth (2004) in ähnlicher Weise im Oberengadin angewendet wurde. Dazu wurde die Bodentypenkarte nach einem Modelldurchlauf auf ihre Gültigkeit hin überprüft, in dem sie mit den 89 im Untersuchungsgebiet vorhandenen Bodenprofilen verglichen wurde. Von Profilstandorten mit abweichenden Validierungsergebnissen wurden die Standortfaktoren bestimmt, anschliessend die Modellregeln auf ihre Plausibilität hin überprüft, und diese allenfalls entsprechend angepasst. Diese Anpassung der Regelbasis wurde nur in den ersten beiden Modelldurchläufen vorgenommen. Während vier weiteren Modelldurchläufen wurden nur noch geringfügige Anpassungen an den Defuzzifikationsfunktionen vorgenommen. Es zeigte sich zum Beispiel, dass die Extrembodentypen der Bodenentwicklungsreihen (‚Entwickelte Böden‘ und ‚Kein Boden‘) bei der Schwerpunktberechnung eine zu geringe Gewichtung erzeugten. Folglich wurden die Funktionsschnittpunkte der Funktionen verschoben, um diesen Bodentypen mehr Gewicht zu verleihen (vgl. Kapitel 3.3.4.6).

Es wurden folgende drei Vergleichsverfahren mit einer identischen Vorgehensmethodik angewendet:

1. Übereinstimmung der Bodentypen in %

Dabei werden die modellierten Bodentypen eins zu eins mit den Bodenprofilen verglichen.

2. Übereinstimmung der Bodentypen in % ohne Berücksichtigung der geologischen Substratverhältnisse

Bei diesem Verfahren wurde analog zu Punkt eins vorgegangen mit dem Unterschied, dass die geologischen Substratverhältnisse speziell berücksichtigt wurden. Profile, die aufgrund der ungenauen geologischen Substratkarte nicht korrekt modelliert werden konnten, wurden folglich nicht in den Vergleich miteinbezogen. Der Fehlerfaktor, der durch die generalisierte Substratkarte entsteht, konnte somit für diesen Vergleich eliminiert werden.

3. Übereinstimmung der Entwicklungsstufen in %

Der Vergleich fand nur zwischen den verschiedenen Entwicklungsstufen statt. Die Berücksichtigung der geologischen Substratverhältnisse wurde gänzlich weggelassen. Ein modellierter Karbonatgesteinsboden, der beispielsweise im Feld aufgrund des silikatischen Substrates als Silikatgesteinsboden angesprochen wurde, wäre bei diesem Vergleichsverfahren korrekt modelliert worden, da beide der Entwicklungsstufe 1 angehören.

Trotz dieses dreistufigen Validierungsverfahrens sind nur bedingt Aussagen über die Güte und Qualität des Modells möglich, da nicht genügend Bodenprofile zur Überprüfung vorhanden sind. Gerade beispielsweise bei den Submodulen auf den Geröll- und Felsflächen (Submodule 13, 23, und 33) konnten die Regeln aufgrund fehlender Profile nur sehr beschränkt auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden.

Eine weitere Schwäche stellt ausserdem die Tatsache dar, dass bei dieser Validierungsmethodik flächenhafte Information nur punktuell überprüft werden können. Für eine wirklich zuverlässige Validierung müsste in jeden Fall eine sehr genaue Bodenkarte zur Verfügung stehen, mit welcher sich die Modellkarte überprüfen liesse. Aus Kostengründen und aufgrund des strengen Schutzstatus im Nationalpark ist eine hoch aufgelöste Bodenkartierung nicht realisierbar.

Die Resultate der Modellvalidierung werden im Resultatteil unter Kapitel 4.3.1 beschrieben.

3.3.8 Ableitung weiterer Bodeneigenschaften

Anhand der Zugehörigkeitswerte der Bodentypenkarte konnte der durchschnittliche Oberboden-pH sowie die durchschnittliche Bodenmächtigkeit abgeleitet werden. Die Resultatkarten befinden sich in Kapitel 4.4 und werden dort unter Berücksichtigung des hier beschriebenen methodischen Ansatzes interpretiert.

3.3.8.1 Gemittelter Oberboden-pH

Der Säurezustand eines Bodens ist eine der wichtigsten Steuergrössen im Pflanzen-Bodensystem und hat auf die Bodenbildung einen grossen Einfluss. Der Säurezustand beeinflusst praktisch alle biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften im Boden (Walthert, 2004). Der pH-Wert der Bodenlösung im Oberboden an einem Standort ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Die mineralogische Zusammensetzung des geologischen Substrates und der Verwitterungsgrad beeinflussen dabei den pH in starkem Masse. Generell versauern in humiden Klimaten die Böden mit zunehmender Bodenentwicklung, weil ihnen durch bodeninterne Prozesse oder von aussen mehr H^+ -Ionen zugeführt werden als sie neutralisieren können (Scheffer et al., 2002).

Als Oberboden werden gemäss Walthert et. al. (2004) alle A und E-Horizonte eines Bodenprofils definiert. Bei zwei oder mehr A-Horizonten wurde der Mittelwert verwendet. Übergangshorizonte, wie zum Beispiel ein AC-Horizont, wurden nicht zum Oberboden gezählt.

Für jede geologische Substrateinheit wurde in einem ersten Schritt eine empirisch ermittelte lineare Funktion aus den Laboranalysewerten der Bodenproben berechnet. In Wirklichkeit wird der Zusammenhang zwischen Bodenentwicklung und Oberboden-pH nicht linear verlaufen. Abbildung 30 zeigt die pH-Wertverteilung von 26 Bodenprofilen auf silikatischem Ausgangsgestein. Die Streuung innerhalb einer Entwicklungsstufe liegt im Bereich von einer bis drei pH-Einheiten, fällt also recht gross aus. Man muss sich bewusst sein, dass diese lineare Zuordnungsfunktion ein gemittelter Wert des Oberboden-pH ermittelt.

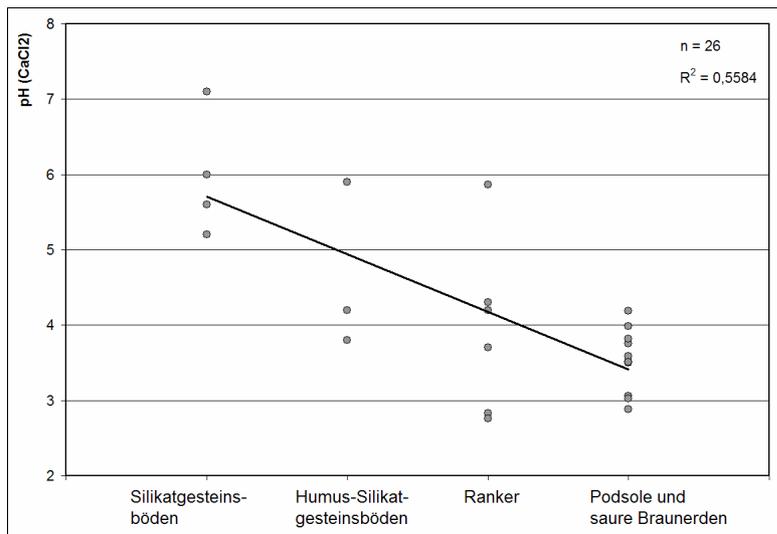


Abbildung 30: pH-Zuordnungsfunktion der silikatischen Bodenentwicklungsreihe

Die Zuordnungsfunktion bei den Mischgesteinsböden ist in Abbildung 31 zu sehen. Bei den Humus-Mischgesteinsböden und Mischgesteinsböden stehen nur die Werte von zwei Profilen zur Verfügung. Dies kann so akzeptiert werden, da man davon ausgehen kann, dass die pH-Werte dieser Böden im neutralen bis leicht alkalischen Bereich liegen müssen. Problematisch ist die grosse Streuung der Werte bei den Regosolen und Braunerden. Diese dürfte im Wesentlichen auf das spezifische Mischverhältnis von silikatischen und karbonatischen Komponenten zurückzuführen sein.

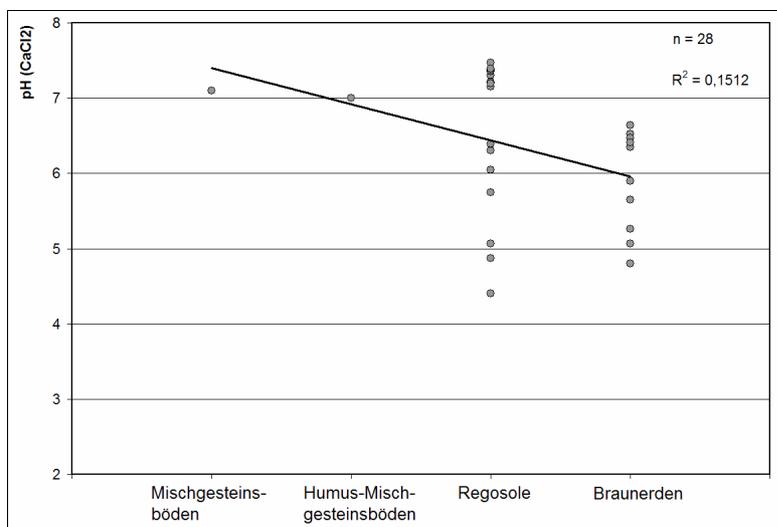


Abbildung 31: pH-Zuordnungsfunktion der gemischten Bodenentwicklungsreihe

Bei den karbonatischen Böden ist klar, dass die pH-Werte alle im schwach alkalisch bis leicht sauren Bereich zu liegen kommen. Der Funktionsverlauf stimmt von der Qualität her sicherlich nicht schlecht. Bei den Karbonatgesteinsböden liegen die pH-Werte noch eindeutig im leicht alkalischen Bereich, während sie bei den Rendzinen ein wenig unter den neutralen Bereich fallen. Bei den Rendzinen ist ausserdem die fortgeschrittene Entkarbonatisierung einzelner Oberböden zu erkennen, bei diesen befindet sich der pH im schwach sauren Bereich.

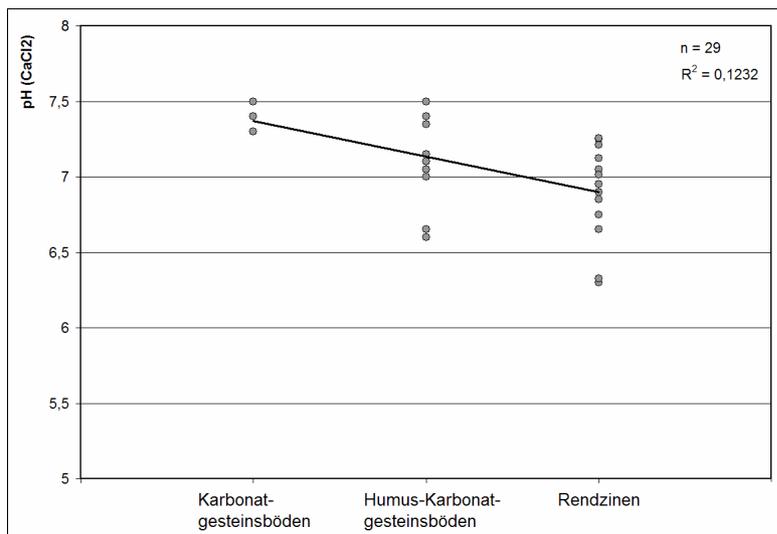


Abbildung 32: pH-Zuordnungsfunktion der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe

Der modellierte, gemittelte pH-Wert für eine Rasterzelle konnte anhand der Zuordnungsfunktionen und den Zugehörigkeitswerten der einzelnen Bodentypen abgeleitet werden. Die Summe der Zugehörigkeitswerte zweier benachbarter Bodentypen ergibt aufgrund des Verlaufs der Defuzzifikationsfunktionen (vgl. dazu Kapitel 3.3.4.6) immer 100 %. Dieses Verhältnis der Zugehörigkeitswerte dient als Input bei der pH-Modellierung. Ein schematisches Beispiel dazu wird in Abbildung 33 gezeigt. Das Bodentypenmodell berechnete für diesen Standort einen 40-prozentigen Silikatgesteinsboden und entsprechend einen 60-prozentigen Humus-Silikatgesteinsboden. Diesem Verhältnis zu Folge entspricht dies einem durchschnittlichen pH-Wert von 5,4.

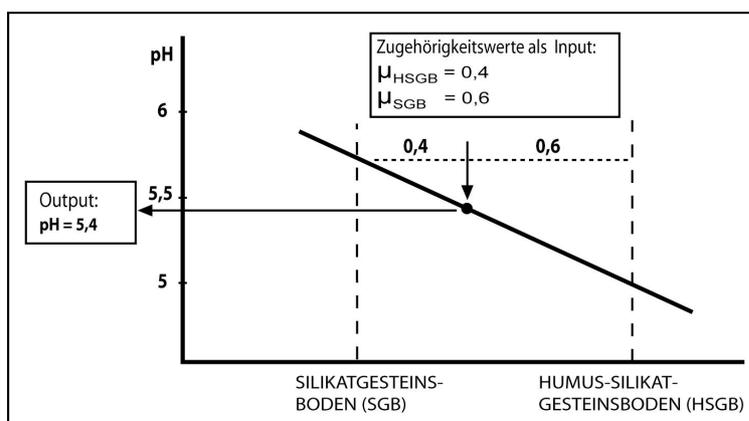


Abbildung 33: Schematische Darstellung der pH-Zuordnung mittels den Zugehörigkeitswerten

Für den modellierten Bodentypen ‚Kein Boden‘ standen keine Bodenproben aus dem Feld zur Verfügung. Somit beschränkten sich die Zuordnungsfunktionen nur auf die wirklichen Bodentypen. Für ‚Kein Boden‘ wurde daher ein Standardwert verwendet, der aus den C-Horizontwerten der Gesteinsböden abgeschätzt wurde. Für Flächen ohne Bodenbildung auf silikatischem Substrat wurde ein pH von 5,5 angenommen, bei den karbonatischen und gemischten Substraten ein pH von 7,5.

Eine Abschätzung zu den pH Werten konnte bei den modellierten Auengesteinsböden nicht gemacht werden, da keine Unterscheidung nach dem geologischen Substrat erfolgte. Auch der

pH der Nassböden wurde nicht modelliert, weil die Nassböden eine heterogene Klasse von verschiedenen Bodentypen darstellen. Zusätzlich beeinflusst die chemische Zusammensetzung des Grund- und Hangwassers den pH der Nassböden.

3.3.8.2 Gemittelte Bodenmächtigkeit

Für die Modellierung der gemittelten Bodenmächtigkeit wurde der gleiche methodische Ansatz wie bei der pH-Modellierung verwendet, mit dem Unterschied, dass exponentielle Zuordnungsfunktionen verwendet wurden, die ebenfalls aus den Profildaten hergeleitet wurden. Die Verwendung exponentieller Funktionen ergab in diesem Fall um einiges bessere Bestimmtheitsmasse als bei linearen Funktionen.

Als Bodenmächtigkeit wurde die Tiefe bis zur Obergrenze des Gesteinshorizontes definiert, also die Summe aller Mächtigkeiten der Horizonte, welche sich über dem C-Horizont befinden. Bei vielen Bodenprofilen war ein fließender Übergang in den Gesteinshorizont zu beobachten, darum war eine exakte Bestimmung der Gesteinshorizontgrenze oft schwierig. Die Mächtigkeiten von Übergangshorizonten, wie beispielsweise (A)C oder BC wurden ebenfalls berücksichtigt.

Die Bodenentwicklungsreihe auf silikatischem Substrat zeigt eine relativ gute Korrelation zwischen Bodenentwicklung und Bodenmächtigkeit. Die durchschnittliche Bodenmächtigkeit reicht von weniger als 10 cm bei den Silikatgesteinsböden bis zu 80 cm bei den Podsole und sauren Braunerden. Die Werte bei den Humus-Silikatgesteinsböden und Rankern muten etwas gar mächtig an, dies hat jedoch damit zu tun, dass die Tiefe der Übergangshorizonte auch berücksichtigt wurde.

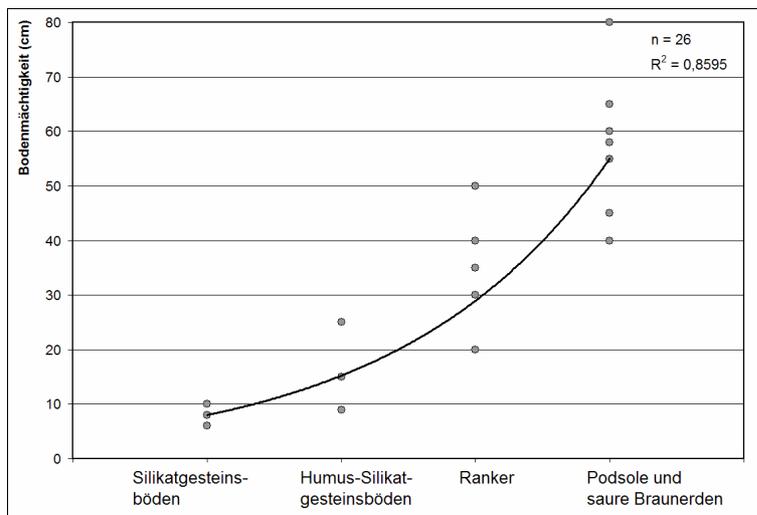


Abbildung 34: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der silikatischen Bodenentwicklungsreihe

Die Werteverteilung bei den Böden auf gemischtem Substrat ist etwas problematisch, da einerseits nur je ein Wert bei den Rohböden vorhanden ist, und andererseits die Streuung bei den Regosolen und Braunerden sehr gross ausfällt und zudem sich auch stark überschneidet. Dies ist vor allem auf die Tatsache zurückzuführen, dass bei Regosolen mit kleinen Kohlenstoffgehalten sich eine beginnende Verbräunung von tieferen Gesteinsschichten schon nach relativ kurzer Entwicklungszeit beobachten lässt.

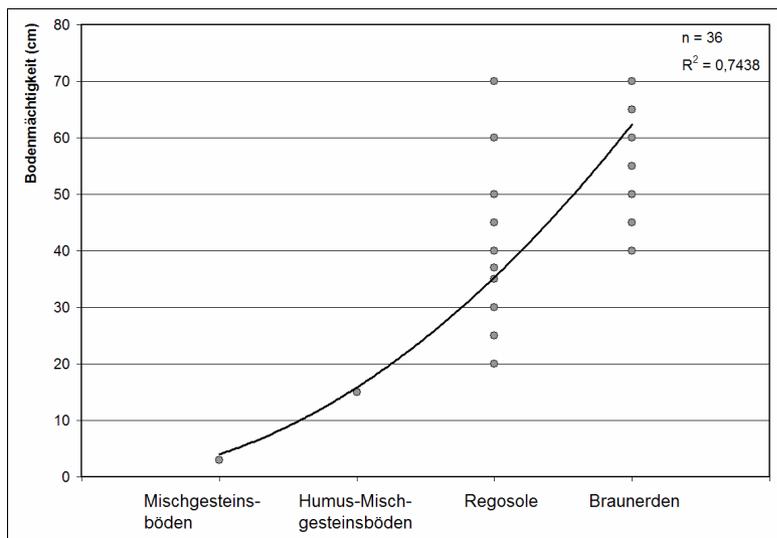


Abbildung 35: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der silikatisch-karbonatischen Bodenentwicklungsreihe

Bei den karbonatischen Böden bildet die Funktion die mittlere Bodenmächtigkeit der Karbonatgesteinsböden und Humus-Karbonatgesteinsböden recht gut ab. Einzig die Mächtigkeit bei den Rendzinen ist mit Unsicherheiten verbunden, da die Streuung recht gross ausfällt.

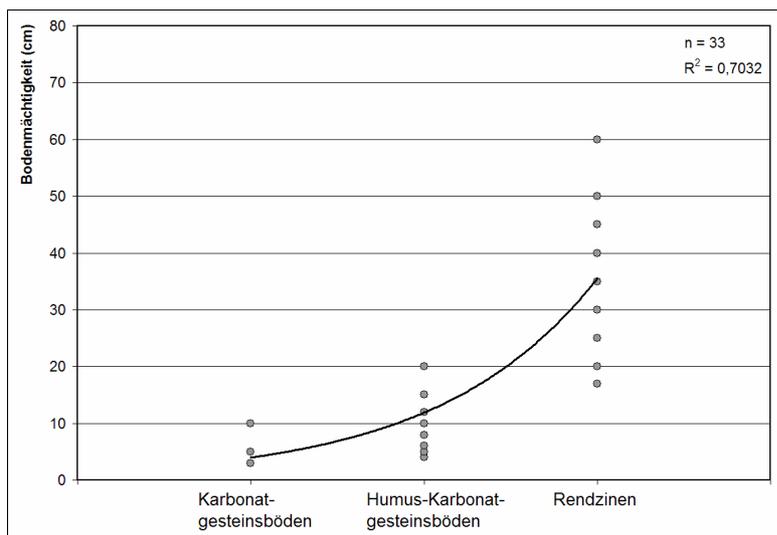


Abbildung 36: Bodenmächtigkeits-Zuordnungsfunktion der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe

Dem Bodentypen ‚Kein Boden‘ wurde ein fester Wert von 0 cm zugeordnet, da auf diesen Flächen die Bodenbildung noch nicht eingesetzt hat. Den Auengesteinsböden ebenfalls wurde ein Standardminimalwert von 2 cm Bodenmächtigkeit zugewiesen, da davon ausgegangen wird, dass diese Böden mit einer gewissen Regelmässigkeit überflutet werden und sich somit keine grösseren Bodenmächtigkeiten entwickeln können.

Den Nassböden wurde keine Bodenmächtigkeit zugewiesen, da diese Klasse aus verschiedenen Bodentypen besteht, welche sehr unterschiedliche Bodenmächtigkeiten aufweisen können. Zum Beispiel die Mächtigkeit von Mooren und Halbmooren hängt im Wesentlichen vom Grundwasserstand und den Umweltbedingungen für die Moorgesellschaften ab.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Beispiele wichtiger Bodentypen im Gebiet des Nationalparks

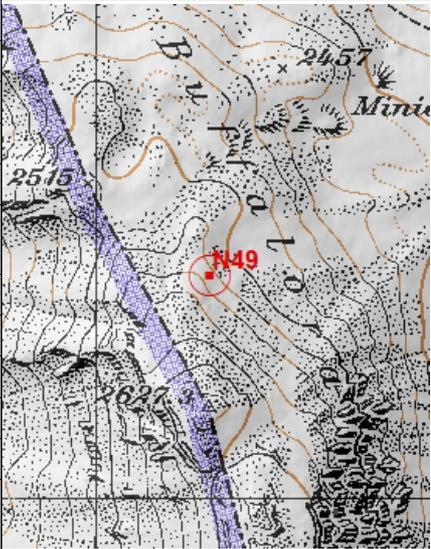
In diesem Kapitel sollen einige wichtige Bodentypen anhand von 12 konkreten Beispielen beschrieben werden. Es ist zu beachten, dass bei sehr geringmächtigen Horizonten teilweise keine Bodenproben entnommen werden konnten.

Die folgenden Horizontbezeichnungen und Signaturen richten sich nach Lüscher (1991) und Richard et al. (1978). Die vollständigen Profilprotokolle der jeweiligen Bodenprofile befinden sich im Anhang.

4.1.1 Profil N49: Karbonatgesteinsboden

Profil N49 ist ein typischer Karbonatgesteinsboden, wie er im Nationalpark und dessen Umgebung oberhalb der Waldgrenze häufig zu finden ist. Er liegt etwas ausserhalb des Nationalparks an einem sehr steilen Nordosthang des Munt Buffalora, ungefähr 100 Meter unterhalb des Gipfels. Die Steilheit des Geländes und das Fehlen einer geschlossenen Vegetationsdecke führen zu Steinschlag und intensiven Verlagerungsprozessen von Feinerde- und Skelettmaterial.

Tabelle 19: Standorteigenschaften von Profil N49

Profilnummer	N49	
Bodentyp	Karbonatgesteinsboden	
Humusform	-	
Bodeneignungskarte	U1	
Vegetation	Lückenhaft vorhandene Pioniervegetation	
Geologie / Substrat	100 % dunkelgraue Dolomite (Turettas-Dolomit)	
Geomorphologie	Aktive Schutthalde (Denundationsfläche)	
Höhe ü. M.	2530 m	
Neigung	90 %	
Geländeform	Sehr steiler, homogener Hang	
Exposition	NO	
Besonderes	-	

Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

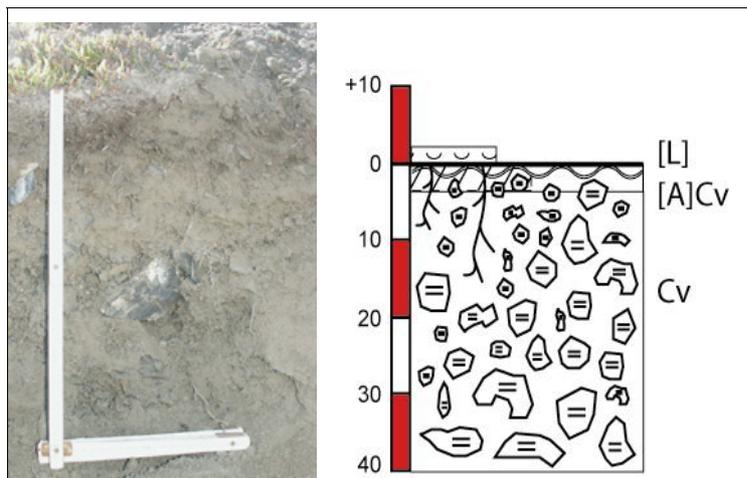


Abbildung 37: Photo und Skizze von Profil N49

Ein Streuhorizont [L] ist nur sehr lückenhaft vorhanden, der darunter in einen schwachhumosen [A]Cv Horizont übergeht. Die Durchwurzelung ist nur im [A]Cv etwas intensiver und schützt die dort akkumulierte organische Substanz von einer sofortigen Auswaschung. Darunter finden sich nur noch vereinzelt Feinwurzeln. Das ganze Profil besteht aus vorwiegend fein- bis grobkörnigem Dolomitschutt. Die hohe Permeabilität und der grosse Skelettanteil führen regelmässig zu einer Austrocknung des Profils.

Tabelle 20: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N49

Horizontbezeichnung		[A]Cv	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		-	2-40
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	-	59
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	-	38
	Ton (< 0.002 mm) (%)	-	3
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		20-50	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		< 2	0
pH (CaCl ₂)		-	7,5
C _{org} (%)		-	0
C _{anorg} (%)		-	12
N _{tot} (%)		-	0,06
C/N-Verhältnis		-	-

Vom [A]Cv Horizont konnte keine Probe entnommen werden, da dieser zu geringmächtig war. Bemerkenswert ist der hohe Anteil an Feinerde im oberen Teil des Profils. Die Hauptfraktion der Feinerde besteht erwartungsgemäss aus Sand und der Tonanteil im Cv ist mit 3 % extrem klein. Ansonsten zeigen die Analysresultate des Cv Horizontes nichts Aussergewöhnliches. Der pH liegt im leicht alkalischen Bereich. Organischer Kohlenstoff konnte im Cv nicht nachgewiesen werden.

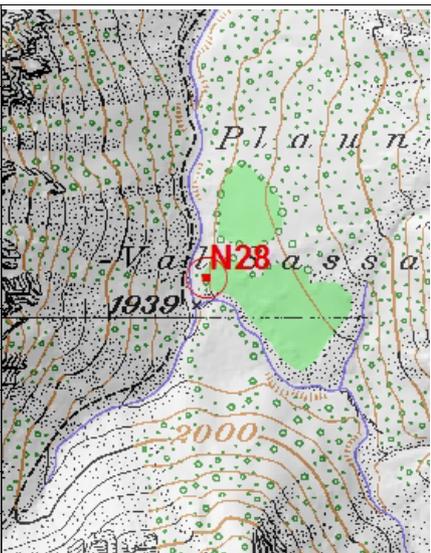
Gemäss der Bodeneignungskarte (Frei, 1980) befindet sich dieser Standort in der Einheit U1, also in Kreden und Felsbänder durchzogenen Hängen der alpinen Kalk-Berglandschaften. Dieser Standort kann generell als sehr flachgründig und extrem skelettreich umschrieben werden. Er besitzt eine hohe Wasserdurchlässigkeit und somit auch ein entsprechend geringes Wasser- und Nährstoffspeichervermögen. Die extreme Lage, die nivalen Klimaverhältnisse

sowie die Erosions- und Verlagerungsprozesse verhindern eine fortgeschrittene Bodenentwicklung. Der Karbonatgesteinsboden kann unter diesen Standortverhältnissen als Klimaxboden angesehen werden.

4.1.2 Profil N28: Humoser Auen-Karbonatgesteinsboden

Profil N28 befindet im hinteren Teil des Val Cluozza, dort wo sich das Tal in die Seitentäler Val Sassa und Val dal Diavel verzweigt. Es liegt einerseits im Einflussbereich der beiden Bäche, die aus den Seitentälern führen, andererseits auf einem flachen Schwemmkegel am Osthang des Piz Murter. Das Ausgangsgestein besteht vorwiegend aus schwarzen Kalken und Dolomiten des Hauptdolomits, welche dem Profil eine dunkle Farbe verleihen. Die Vegetation besteht aus einem sehr offenen Legföhrenbestand (*Pinus mugo* subsp. *mugo*), der Hang aufwärts in einen aufrechten Bergföhrenwald übergeht. Die nicht lückenlos vorhandene Strauch- und Krautschicht besteht vorwiegend aus Erika (*Erica carnea*) und Moosen.

Tabelle 21: Standorteigenschaften von Profil N28

Profilnummer	N28	
Bodentyp	Humoser Auen-Karbonatgesteinsboden	
Humusform	-	
Bodeneignungskarte	U5	
Vegetation	Sehr lückiger Legföhrenbestand (<i>Pinus mugo mugo</i>), Erika (<i>Erica carnea</i>), Moose	
Geologie / Substrat	Vorwiegend schwarze Kalke und Dolomite der Quaternals-Formation (Hauptdolomit)	
Geomorphologie	Schwemmfächer	
Höhe ü. M.	1940 m	
Neigung	5 %	
Geländeform	Sehr flacher Hang	
Exposition	W	
Besonderes	A Horizont wird durch einen alluvialen, sandigen C Horizont überlagert	

Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

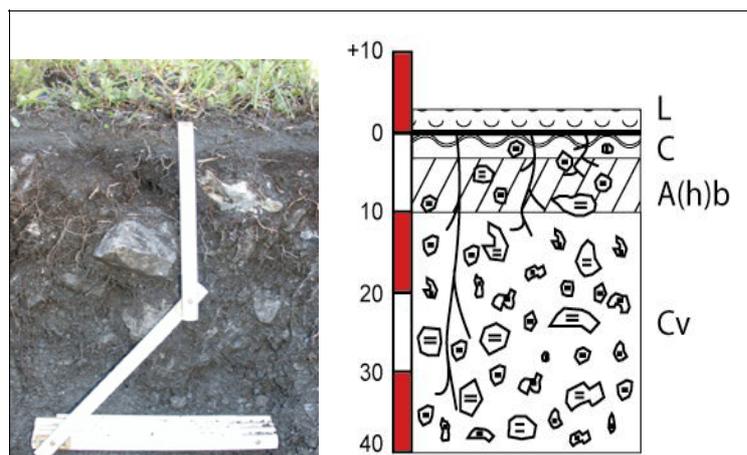


Abbildung 38: Photo und Skizze von Profil N28

Unter einer dünnen Streuschicht fällt sofort der gleichmässige, ungefähr 3 cm mächtige C Horizont auf, der hauptsächlich aus dunklen, alluvial abgelagerten Sanden besteht. Ob dieses Sediment von den Bächen aus dem Val Sassa und dem Val dal Diavel oder vom Wildbach des Schwemmfächers stammt, konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Aufgrund des geringen Skelettgehaltes von weniger als 5 %, ist eine Ablagerung durch die Talbäche wahrscheinlicher, da Wildbäche immer auch gröberes Geschiebe transportieren.

Darunter folgt ein begrabener, schwach humoser A(h)b Horizont, der im Verhältnis zu den beiden C Horizonten am intensivsten durchwurzelt ist. Die absolute Durchwurzelungstiefe konnte nicht festgestellt werden, da die Profilmächtigkeit zu gering ist. Bei den ausschliesslich karbonatischen Ausgangsgesteinen, weisen die pH-Werte aller Horizonte erwartungsgemäss schwach alkalische Werte auf.

Tabelle 22: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N28

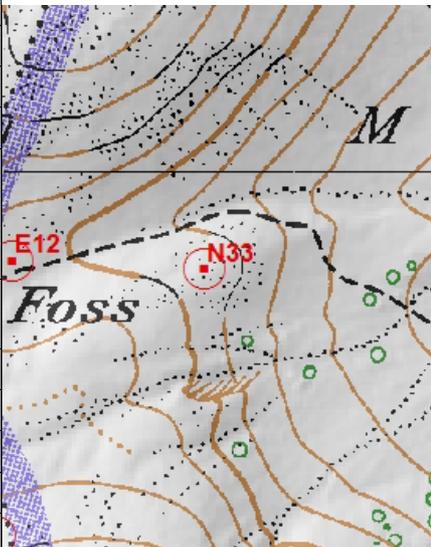
Horizontbezeichnung		C	A(h)b	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		0-2	2-8	10-25
Körnung (geschätzt)	Sand (0.06-2 mm) (%)	70-90	50-80	40-75
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	5-30	10-40	20-50
	Ton (< 0.002 mm) (%)	< 5	10-30	5-10
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		0-5	20-50	>75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		< 2	2-5	0
pH (CaCl ₂)		7,4	7,2	7,5
C _{org} (%)		-	9,83	-
C _{anorg} (%)		12,4	4,6	11,6
N _{tot} (%)		0,07	0,67	0,04
C/N-Verhältnis		-	14,6	-

Dieser humose Auen-Karbonatgesteinsboden stellt gemäss Definition (vgl. Kapitel 2.3) ein Spezialfall des Humus-Karbonatgesteinsboden dar, da eine durchgehende Streuauflage vorhanden ist. Durch wiederkehrende Überschwemmungen der Bäche mit Erosion und Ablagerung unterliegt die Bodenbildung an diesem Standort starken Störungen und wird sich unter diesen Umständen nicht wesentlich weiterentwickeln können.

4.1.3 Profil N33: Humus-Karbonatgesteinsboden

Profil N33 befindet im hintersten Teil des Val Mingers auf 2290 Meter über Meer nahe des Passübergangs „Sur il Foss“. Es liegt auf einem mässig steilen aber sehr exponierten Hangrücken, der von Solifluktionerscheinungen geprägt ist. Dies führt zu einer lückigen, mosaikartig ausgeprägten Vegetationsdecke, welche aus Silberwurz (*Dryas Octopetala*), Blaugras (*Sesleria caerulea*) und Blaugrünem Steinbrech (*Saxifraga caesia*) besteht. Der ganze Hangrücken besteht aus fein- bis mittelkörnigem Dolomitschutt.

Tabelle 23: Standorteigenschaften von Profil N33

Profilnummer	N33	
Bodentyp	Humus-Karbonatgesteinsboden	
Humusform	Mull	
Bodeneignungskarte	U5	
Vegetation	Alpine Pioniergesellschaft aus Silberwurz (<i>Dryas Octopetala</i>), Blaugras (<i>Sesleria caerulea</i>) und Blaugrüner Steinbrech (<i>Saxifraga caesia</i>)	
Geologie / Substrat	100 % fein- mittelkörniger, kantiger Dolomitschutt	
Geomorphologie	Solifluktionerscheinungen	
Höhe ü. M.	2290 m	
Neigung	20 %	
Geländeform	Hangrücken (Kuppenlage)	
Exposition	NO	
Besonderes	Wegen Solifluktion kleinräumig mit Karbonatgesteinsböden vergesellschaftet	

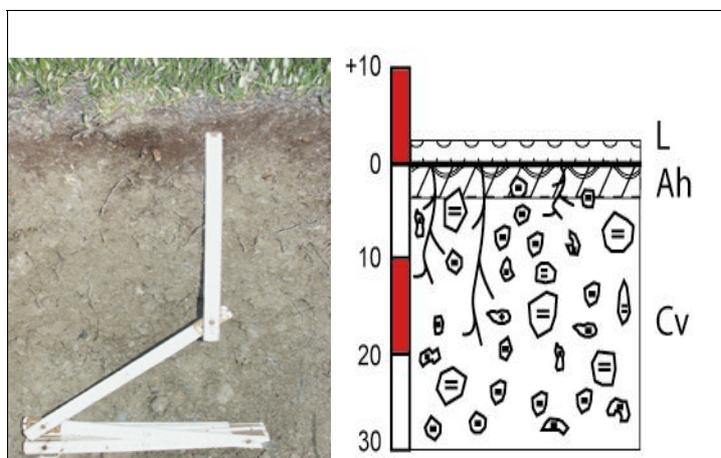


Abbildung 39: Photo und Skizze von Profil N33

Unter der Streuauflage folgt ein Ah Horizont mit etwa 3 cm Mächtigkeit. Aufgrund des langsamen Vegetationswachstums ist der Eintrag an organischem Material sehr gering. Das C/N-Verhältnis von 20,9 bewegt sich gemäss AG Boden (1994) im mittleren Bereich. Dies ist

Hinweis darauf, dass der Abbau der Streu nicht optimal verläuft. Verantwortlich dafür sind die trockenen Standortverhältnisse und die tiefen Bodentemperaturen, welche die Aktivität der Bodenorganismen hemmen.

Da von diesem Profil keine Korngrössenanalyse vorliegt, zeigt Tabelle 24 die mittels Fingerprobe abgeschätzte Korngrössenverteilung der Feinerde. Der Tongehalt von 10-20 % des Ah Horizont dürfte etwas zu hoch geschätzt worden sein, da die feinkörnige organische Substanz bei der Fingerprobe nicht von der anorganischen Feinerde getrennt werden kann.

Tabelle 24: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N33

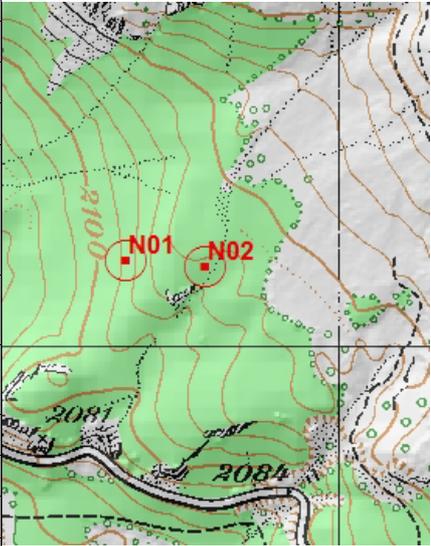
Horizontbezeichnung		Ah	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		0-3	10-20
Körnung (geschätzt)	Sand (0.06-2 mm) (%)	20-60	30-70
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	10-50	20-50
	Ton (< 0.002 mm) (%)	20-30	10-20
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		10-20	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		5-10	0
pH (CaCl ₂)		7,3	7,4
C _{org} (%)		19,5	-
C _{anorg} (%)		7,5	-
N _{tot} (%)		0,9	-
C/N-Verhältnis		20,9	-

Dieser Humus-Karbonatgesteinsboden ist aufgrund des auffälligen Vegetationsmosaiks kleinräumig mit Karbonatgesteinsböden vergesellschaftet. An Stellen, an denen sich keine geschlossene Vegetationsdecke bilden konnte, finden sich Karbonatgesteinsböden. Die Grenze zwischen diesen beiden Bodentypen verläuft sehr scharf. Wegen der exponierten Lage, den aktiven Bodenbewegungen (Solifluktion) und den trockenen, extremen Klimaverhältnissen ist die Bodenentwicklung stark gehemmt und wird immer wieder gestört. Die Humus-Karbonatgesteinsböden dürften sich somit an diesem Standort nicht wesentlich weiterentwickeln.

4.1.4 Profil N02: modrighumose Rendzina

Der Profilstandort N02 liegt etwas ausserhalb der Nationalparkgrenzen auf 2175 Meter über Meer westlich von Buffalora. Der Baumbestand besteht aus einem lückigen Bestand von aufrechten Bergföhren (*Pinus mugo uncinata*), die Krautschicht vorwiegend aus Erika-Zwergsträuchern (*Erica carnea*) und gestreiftem Seidelbast (*Daphne striata*). Das Substrat setzt sich ausschliesslich aus relativ feinkörnigem Dolomitschutt des Vallatscha-Dolomits zusammen. Silikatische Gesteinsfragmente konnten nicht nachgewiesen werden. Die nur mittelsteile (30%) und dicht bewachsene Lage am Südosthang eines kleinen Hangrückens lässt darauf schliessen, dass die geomorphologischen Verhältnisse recht stabil sind. Einige leicht schiefe Bäume deuten aber darauf hin, dass sich der Hang geringfügig bewegt.

Tabelle 25: Standorteigenschaften von Profil N02

Profilnummer	N02	
Bodentyp	Modrighumose Rendzina	
Humusform	Mullartiger Moder (Xeromoder)	
Bodeneignungskarte	U5	
Vegetation	Aufrechte Berföhre (<i>Pinus mugo uncinata</i>), Erika (<i>Erica carnea</i>), gestreifter Seidelbast (<i>Daphne stirata</i>), Preiselbeere (<i>Vaccinium vitis idaea</i>)	
Geologie / Substrat	100% grauer, feinkörniger Dolomitschutt (Vallatscha-Dolomit)	
Geomorphologie	Moränenschutt in einem inaktiven Bereich des Waldes	
Höhe ü. M.	2175 m	
Neigung	30 %	
Geländeform	Mässig steiler Hang an einem Hangrücken	
Exposition	SO	Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)
Besonderes	-	

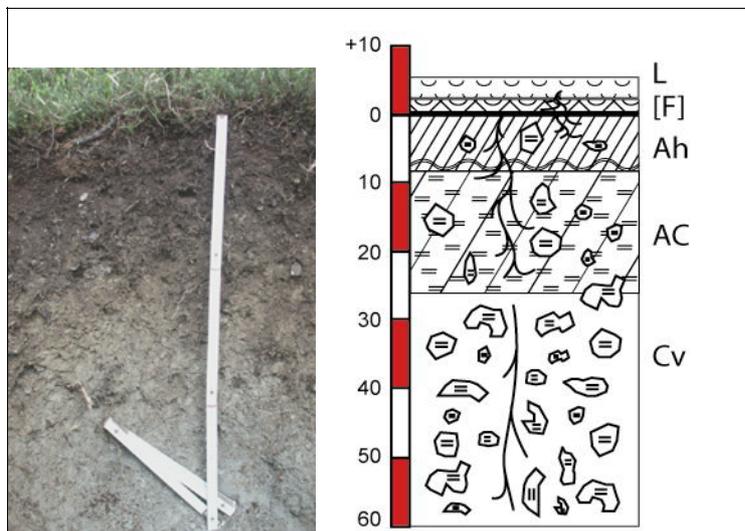


Abbildung 40: Photo und Skizze von Profil N02

Unter einem L-Horizont, der vorwiegend aus Erika-Streu besteht, folgt ein unregelmässig ausgebildeter Fermentations-Horizont (F) von 0 – 3 cm Mächtigkeit. Die Auflagehorizontabfolge und der Humusformindex von 0.8 lassen auf einen mullartigen Xeromoder schliessen (vgl. Kapitel 3.1.1). Xeromoder bilden sich an Standorten mit längeren Trockenphasen, vorzugsweise an Südhängen der kontinental geprägten Zentralalpentäler. Charakteristisch für diese Humusform ist, dass sowohl ein F- als auch ein mächtiger Ah-Horizont vorhanden sind. Der Abbau der organischen Substanz ist durch periodische Trockenheit eingeschränkt (Blaser et. al, 2005). Das C/N-Verhältnis des Ah-Horizont beträgt 18 und liegt somit im mittleren Bereich. Dies und die Humusform sind Anzeichen für die beschränkte Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden.

Im Ah und AC befinden sich einige Grob- und viele Feinwurzeln, die den Hauptwurzelraum bis in eine ungefähre Tiefe von 25 cm definieren. Die absolute Durchwurzelungstiefe konnte nicht bestimmt werden, da das Profil nur 60 cm tief ist und dort noch einige Feinwurzeln vorkommen.

Die gemessenen pH-Werte (CaCl_2) aller Horizonte liegen im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Beim Ah-Horizont wurde bei der Feldansprache jedoch ein pH-Wert (Hellige) von 6 gemessen (vgl. dazu Profilprotokoll im Anhang). Dieser Unterschied zwischen Labormessung (pH 7,1) und Feldansprache (pH 6) ist wohl darauf zurückzuführen, dass bei der Probenaufbereitung feines Dolomitskelett vermahlen wurde. Der pH-Wert von Ah dürfte also eher im schwach sauren Bereich liegen. Nicht überraschend ist die schwach alkalische Reaktion der beiden Unterbodenhorizonte AC und Cv. Obwohl noch etwas Dolomitskelett im Ah Horizont zu finden ist, befindet die Kalkgrenze wird somit in ungefähr 6-8 cm Tiefe.

Die Korngrößenverteilung in den einzelnen Horizonten ist für entwickelte Karbonatböden wie diese Rendzina typisch. Die Gesteinsverwitterungsrate (Entkarbonatisierung) nimmt mit der Profiltiefe ab, was sich an den ansteigenden Sandgehalten (von 42 auf 65 %) und den abnehmenden Tongehalten (von 17 auf 3 %) gut erkennen lässt. Entsprechend verhält sich auch der Skelettgehalt. Im Oberboden beträgt der Gehalt an Skelettmaterial nur 5 -10 % und nimmt mit der Tiefe stark zu.

Tabelle 26: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N02

Horizontbezeichnung		Ah	AC	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		0-10	15-25	35-45
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	42	47	65
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	41	46	33
	Ton (< 0.002 mm) (%)	17	7	3
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		5-10	10-20	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		5-10	< 2	0
pH [CaCl_2]		7,1	7,3	7,3
Karbonat Feinerde (10% HCl)		Keine Reaktion	Mittleres Aufbrausen	Mittleres Aufbrausen
C_{org} (%)		6,07	1,09	<0,03
C_{anorg} (%)		6,82	9,99	11,82
N_{tot} (%)		0,34	0,07	<0,03
C/N-Verhältnis		18	16	-

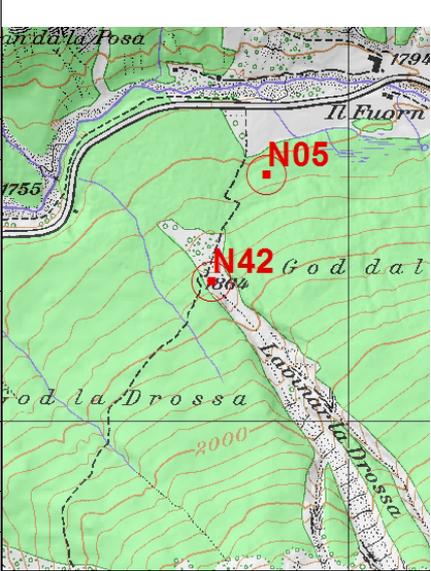
Diese modrighumose Rendzina stellt ein sehr schönes Beispiel eines entwickelten Karbonatbodens dar. Auch die Standortverhältnisse sind für die Ausbildung einer Rendzina typisch. In solchen mässig steilen, geomorphologisch stabilen Erika-Bergföhrenwäldern auf karbonatischen Ausgangsgesteinen finden sich im Alpenraum praktisch immer flach- bis mässig tiefgründige Rendzinen.

4.1.5 Profil N42: Mischgesteinsboden

Dieser Mischgesteinsboden befindet in einem relativ flachen, randlichen Bereich einer mächtigen Murgangrinne am Nordhang des Munt la Schera. Im Einzugsgebiet der Murgangrinne finden sich sowohl silikatisches (Münstertaler Verrucano) als auch karbonatisches (Turettas-

Dolomit) Gestein, welches am Profilstandort als fein- bis mittelkörniger Schutt vorhanden ist. Die Baumbestand besteht aus vereinzelt noch jungen Lärchen (*Larix decidua*) und Bergföhren (*Pinus mugo uncinata*). Das geschätzte Alter des Baumbestandes lässt darauf schliessen, dass der Profilstandort seit mindestens 15 Jahren nicht mehr durch ein Murgangereignis betroffen war. Die aktive Murgangrinne verläuft ungefähr 80 Meter östlich des Standortes.

Tabelle 27: Standorteigenschaften von Profil N42

Profilnummer	N42	
Bodentyp	Mischgesteinsboden	
Humusform	-	
Bodeneignungskarte	U3	
Vegetation	Junger, offener Bestand aus Lärchen (<i>Larix decidua</i>) und Bergföhren (<i>Pinus mugo uncinata</i>). Zusätzlich lückenhafte Pioniervegetation.	
Geologie / Substrat	Fein-grobkörniger gemischter Hangschutt aus Münstertaler Verrucano (Chazfora-Formation) und Dolomiten (Turettas-Dolomit)	
Geomorphologie	Randlicher Bereich einer Murgangrinne (Lavinar da Drossa)	
Höhe ü. M.	1864 m	
Neigung	15 %	
Geländeform	Flacher Hang in Murgangrinne	
Exposition	NW	

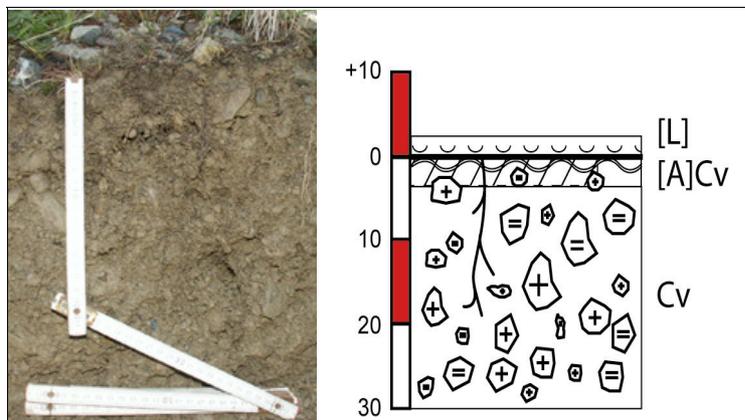


Abbildung 41: Photo und Skizze von Profil N42

Über einem schwach humosen [A]Cv Horizont befindet sich ein geringmächtiger Streuhorizont [L], welcher vorwiegend aus Nadelstreu besteht. Die Durchwurzelung ist nur in den obersten 10 cm etwas intensiver und nimmt mit zunehmender Profiltiefe stark ab. In 30 cm Tiefe finden sich nur noch vereinzelt Feinwurzeln. Das Skelettmaterial besteht ungefähr aus 50 % Dolomit und 50 % Verrucano-Schutt. Die hohe Permeabilität und der grosse Skelettanteil führen regelmässig zu einer Austrocknung des Profils.

Horizontbezeichnung		[A]Cv	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		-	2 - 20
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	-	75
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	-	17
	Ton (< 0.002 mm) (%)	-	7
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		50-75	>75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		< 2	0
pH (CaCl ₂)		-	7,1

Tabelle 28: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N42

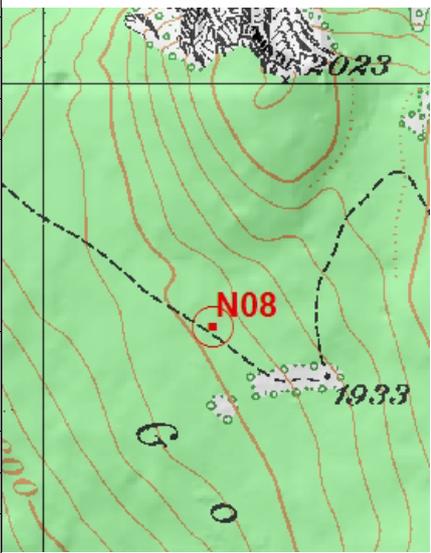
Aufgrund der geringen Mächtigkeit konnten vom [A]Cv Horizont keine Proben entnommen werden. Die Analyseresultate des Cv Horizontes zeigen an sich keine Besonderheiten. Der Skelettanteil ist erwartungsgemäss mit über 50 % in beiden Horizonten sehr hoch, und auch der pH Wert liegt aufgrund des hohen Karbonatgehaltes im neutralen Bereich. Der Sandanteil der Feinerde ist mit 75 % sehr hoch. Dieser Standort besitzt wie alle Rohbodenstandorte nur ein geringes Wasser- und Nährstoffspeichervermögen.

Die spezielle Lage im Einflussbereich des Murgangs lässt vermuten, dass sich dieser Mischgesteinsboden nicht über das Stadium eines Humus-Mischgesteinsboden entwickeln kann. Es wird wohl nur eine Frage der Zeit sein, bis ein nächstes grosses Murgangereignis die beginnende Bodenentwicklung stoppt.

4.1.6 Profil N08: Verbraunter Regosol

Beim Profil N08 handelt es sich um einen verbrauchten Regosol. Der Standort befindet sich an mässig steiler Lage am Westhang des Munt la Schera in einem gemischten Bergföhren-Lärchenbestand. Die Krautschicht besteht aus dichten Erika- und Preiselbeersträuchern (*Erica carnea* und *Vaccinium vitis idaea*). Das Mischverhältnis aus ungefähr 70 % Turettas-Dolomiten und 30 % silikatischen Gesteinen lässt vermuten, dass es sich gemäss Dössegger (1987) um Grundmoränenschutt handelt. Der Profilstandort scheint momentan geomorphologisch sehr stabil zu sein, da keine Anzeichen für Bodenbewegungen (schiefe Bäume) beobachtet werden konnten.

Tabelle 29: Standorteigenschaften von Profil N08

Profilnummer	N08		
Bodentyp	Leicht verbrauchter Regosol		
Humusform	Mullartiger Moder		
Bodeneignungskarte	U7/U2		
Vegetation	Baumbestand aus 50 % aufrechten Bergföhre (<i>Pinus mugo uncinata</i>), 50 % Lärchen (<i>Larix decidua</i>), zusätzlich einige Arten (<i>Pinus cembra</i>). Kraut- und Strauchschicht aus Erika (<i>Erica carnea</i>) und Preiselbeere (<i>Vaccinium vitis idaea</i>)		
Geologie / Substrat	Moränenschutt aus ca. 70 % grauen Dolomiten (Turettas-Dolomit), 30 % silikatisches Gestein		
Geomorphologie	Stabiler, inaktiver Bereich im Wald		
Höhe ü. M.	1904 m		
Neigung	35 %		
Geländeform	Mässig steiler Hang		Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)
Exposition	SW		

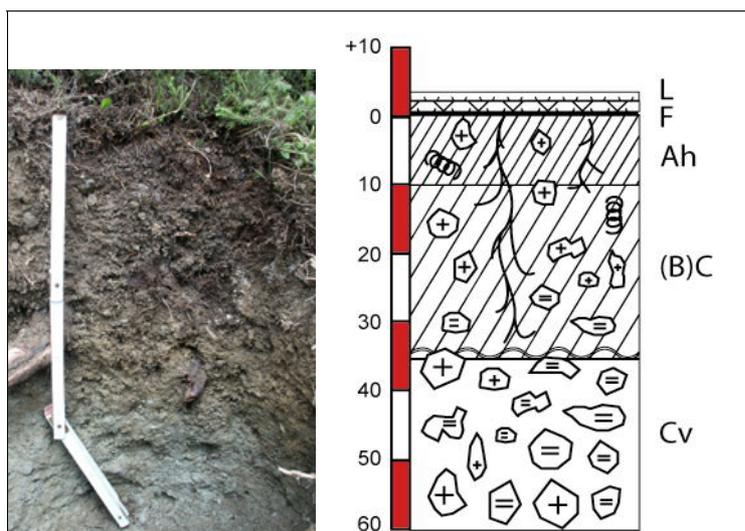


Abbildung 42: Photo und Skizze von Profil N08

Die geringmächtigen L- und F-Horizonte bestehen vorwiegend aus abgestorbenen Erika- und Preiselbeersträuchern sowie Föhrennadeln. Da kein Humusstoffhorizont beobachtet werden konnte und trockene Standortverhältnisse vorherrschen, wurde die Humusform als mullartiger Xeromoder klassifiziert. Das mässig weite C/N-Verhältnis des Ah lässt darauf schliessen, dass der Abbau der organischen Substanz gehemmt ist und das nicht bestimmte C/N-Verhältnis des F-Horizontes wahrscheinlich noch höher (bzw. weiter) liegen wird. Unter dem Fermentationshorizont befindet sich ein schön ausgebildeter Ah-Horizont, dessen krümelige Aggregatstruktur auf die beobachtete Wurmtätigkeit zurückzuführen ist. Der Skelettgehalt im Ah ist mit 10-20 % relativ gering und nimmt mit der Profiltiefe stark zu. Im Gesteinshorizont Cv beträgt er über 50 %. Die Grenze vom Ah zum schwach humosen (B)C Horizont ist aufgrund der intensiven Bioturbation recht diffus ausgebildet. Der (B)C-Horizont weist eine sichtbare Verbraunung auf, welche sich in Abbildung 42 gut erkennen lässt.

Die pH-Werte der einzelnen Horizonte sind typisch für Regosole. Der Ah-Horizont ist vollständig entkarbonatisiert und weist einen pH von 5,7 auf. Mit der Profiltiefe nimmt der pH-Wert zu und erreicht im Cv-Horizont neutrale Werte, da noch Karbonat in Feinerde und Skelett enthalten ist.

Der Sandanteil beträgt im ganzen Profil ungefähr 50 %, während der Tonanteil zugunsten des Schluffs mit der Profiltiefe von 21 auf 12 % abnimmt. Aufgrund des Tonanteils, des Skelettgehaltes und der krümeligen Aggregatstruktur weist der Oberboden ein gewisses Wasserspeichervermögen auf, das aber im Vergleich mit Mittellandböden immer noch gering ist. Während längeren Trockenphasen kann dieser Regosol durchaus austrocknen.

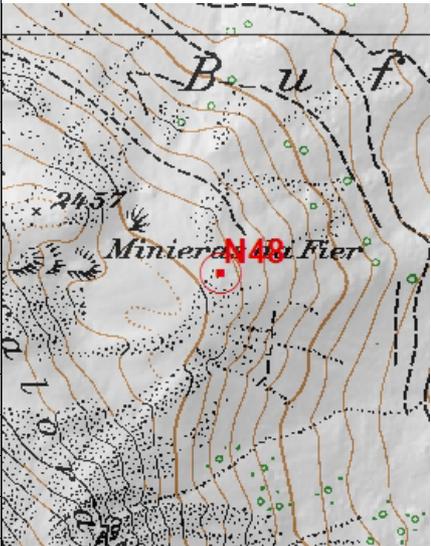
Tabelle 30: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N08

Horizontbezeichnung		Ah	(B)C	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		0-10	15-35	40-60
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	50	52	49
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	29	30	39
	Ton (< 0.002 mm) (%)	21	18	12
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		10-20	20-30	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		5-10	< 2	0
pH (CaCl ₂)		5,7	6,8	7,3
C _{org} (%)		3,9	2,9	-
C _{anorg} (%)		-	-	-
N _{tot} (%)		0,19	0,09	<0,03
C/N-Verhältnis		21	34	-

4.1.7 Profil N48: Humus-Silikatgesteinslithosol

Der vorliegende Humus-Silikatgesteinslithosol gehört zur Klasse der Humus-Silikatgesteinsböden. Er kann als Extremstandort auf silikatischem Gestein bezeichnet werden, da er an einer exponierten Hangkante am Nordosthang des Munt Buffalora liegt. Die nähere Umgebung ist von anstehendem, angewittertem Verrucano-Fels gekennzeichnet. Zwischen diesen Felsplatten wachsen kleine, dichte Vegetationsteppiche.

Tabelle 31: Standorteigenschaften von Profil N48

Profilnummer	N48	
Bodentyp	Humus-Silikatgesteinslithosol	
Humusform	-	
Bodeneignungskarte	U1	
Vegetation	Alpine Grasgesellschaft mit einzelnen Zwergwachholdern (<i>Juniperus communis nana</i>)	
Geologie / Substrat	100 % Münstertaler Verrucano (Chazfora-Formation)	
Geomorphologie	-	
Höhe ü. M.	2390 m	
Neigung	5 %	
Geländeform	Oberhang (Kuppenlage)	
Exposition	NO	
Besonderes	-	

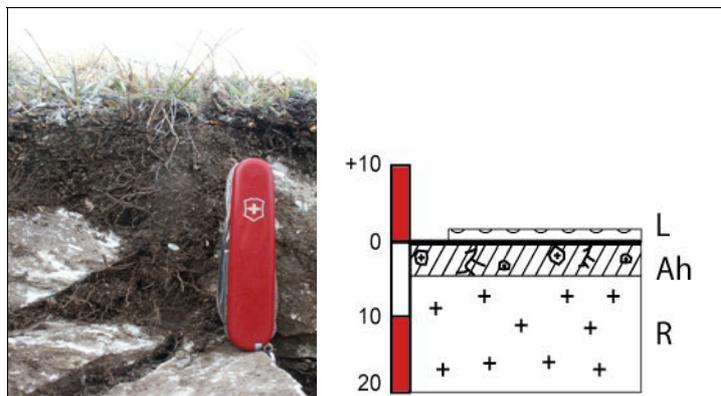


Abbildung 43: Photo und Skizze von Profil N08

Bei dieser minimalen Profiltiefe von 10 cm wurden nur die zwei Horizonte (L und Ah) protokolliert. Das mässig enge C/N-Verhältnis des Ah und die Humusform Mull deuten auf einen guten Abbau der Auflagestreu hin. Der Ah-Horizont ist gleichmässig durchmisch, obwohl keine Anzeichen einer Wurmtätigkeit beobachtet werden konnte.

Unter dem Streuhorizont L befindet sich der kompakte Ah-Horizont, der intensiv durchwurzelt ist. Das Wurzelwachstum wird jedoch durch den in geringer Tiefe anstehenden Fels beschränkt. Wie weit die Wurzeln in die Klüfte der Verrucanofels eindringen können bleibt ungewiss. Der Skeletthalt wird auf 10-20 % geschätzt und liegt somit im Durchschnitt für Oberbodenhorizonte. Ein Grund könnte die Lage unterhalb von dolomitreichen geologischen Einheiten sein. Durch Wind könnte zeitweise karbonatischer Feinstaub abgelagert werden, was die Versauerung des Ah-Horizontes stark verlangsamt.

Tabelle 32: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N48

Horizontbezeichnung		Ah	R
Probeentnahmetiefe (cm)		0-5	-
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	30-70	-
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	20-50	-
	Ton (< 0.002 mm) (%)	10-20	-
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		10-20	-
Humusgehalt (geschätzt) (%)		5-10	-
pH (CaCl ₂)		6,0	-
C _{org} (%)		4,9	-
C _{anorg} (%)		-	-
N _{tot} (%)		0,39	-
C/N-Verhältnis		13	-

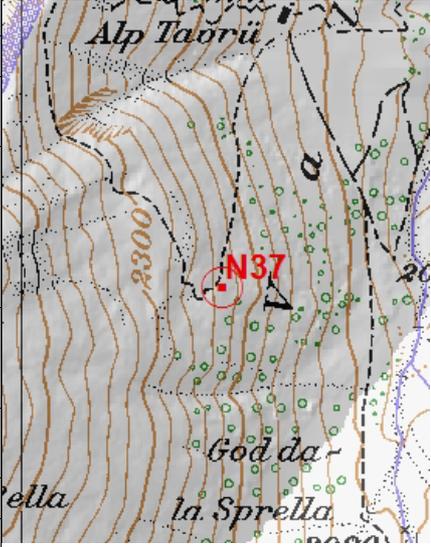
Dieser Humus-Silikatgesteinslithosol ist an solch extremen Standorten immer auch mit Silikatgesteinsböden auf Lockermaterial und Rankern vergesellschaftet. Im Gegensatz zu den Silikatgesteinsböden existiert aber bei den Humus-Silikatgesteinsböden eine durchgehende organische Auflage.

Der Trockenstress für die Pflanzen muss an diesem Standort sicherlich gross sein. Der extrem flachgründige Ah-Horizont besitzt ein nur minimales Wasserspeichervermögen und wird infolge der hohen und direkten Einstrahlung sehr schnell austrocknen. Zudem kann Wasser im klüftigen Fels ungehindert abfließen.

4.1.8 Profil N37: Ranker

Profil N37 befindet sich auf 2225 Meter über Meer an einem steilen Osthang (70%) im Val Tavrü. Es liegt etwas ausserhalb des Nationalparks auf einer Alpweide, welche vorwiegend aus Zwergstrauchheiden besteht. Die dominierenden Sträucher am Profilstandort sind die Zwergwachholder, die rotblättrige Alpenrose sowie die Heidelbeere. Das Ausgangsgestein besteht ausschliesslich aus Verrucano und Orthogneisen, welche oberhalb des Standortes anstehen. Die grösstenteils geschlossene Vegetationsdecke stabilisiert den Hang recht gut, trotzdem lassen sich an einigen Stellen Hangbewegungen beobachten, dies vor allem in Zusammenhang mit der Beweidung durch Nutztiere.

Tabelle 33: Standorteigenschaften von Profil N37

Profilnummer	N37		
Bodentyp	Ranker		
Humusform	Typischer Moder		
Bodeneignungskarte	U5		
Vegetation	Extensiv bewirtschaftete Alpweide mit Zwergsträuchern. Vorwiegend Zwergwachholder (<i>Juniperus communis nana</i>), rostblättrige Alpenrose (<i>Rhododendron ferrugineum</i>) und Heidelbeere (<i>Vaccinium myrtillus</i>).		
Geologie / Substrat	Fein-grobkörniger silikatischer Hangschutt aus Münstertaler Verrucano (Chazfora-Formation) und Orthogneise		
Geomorphologie	Wenig Steinschlag und Hangbewegung wahrscheinlich. Ansonsten stabil		
Höhe ü. M.	2225 m		
Neigung	70 %		
Geländeform	Steiler Hang		
Exposition	O		
			Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

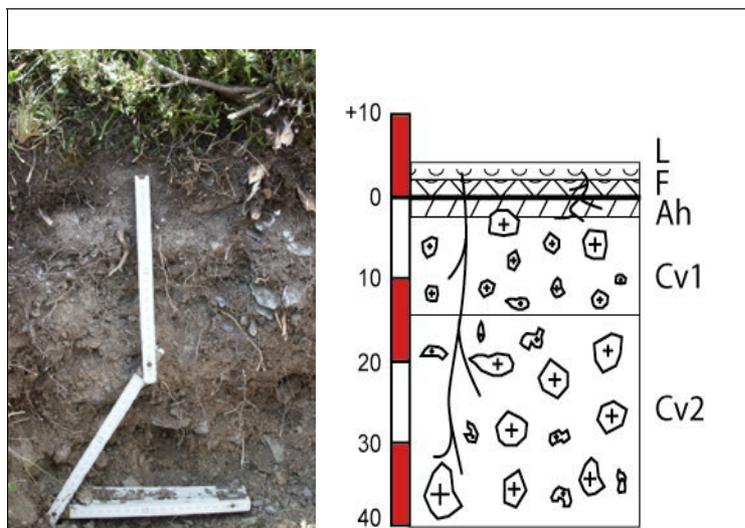


Abbildung 44: Photo und Skizze von Profil N37

Die Streu dieses Rankers besteht aus abgestorbenen Zwergwachholdernadeln sowie Alpenrosen- und Heidelbeerblättern. Unter dem L Horizont folgt ein Fermentationshorizont von ungefähr 2 cm Mächtigkeit, der viele Feinwurzeln und einige Grobwurzeln enthält. Die Humusform wird als typischer Moder klassifiziert. Ein sehr geringmächtiger Humusstoffhorizont konnte nur an einigen Stellen ansatzweise beobachtet werden und wurde deshalb nicht explizit protokolliert. Die Humusform, wie auch das mittlere C/N-Verhältnis von 17 des Ah-Horizontes sind Anzeichen dafür, dass der Abbau der organischen Substanz gehemmt ist. Erstens verhindern das stark saure Milieu (vgl. pH-Werte in Tabelle XX) und die klimatischen Verhältnisse eine hohe biologische Aktivität im Boden und zweitens besteht die Streu hauptsächlich aus schwer abbaubaren Pflanzenresten (Wachholdernadeln). Die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen wird als gering erachtet, da die Nährstoffe in der schwer abbaubaren Streu für die Pflanzen nicht verfügbar sind und zusätzlich ein grosses Auswaschungspotential (hoher Skelettgehalt) des Bodens besteht.

Der Unterschied von Cv1 zu Cv2 besteht hauptsächlich in der Skelettgrösse. Der Cv1-Horizont besteht zu mehr als 75 % aus Feinskelett (0,2-5 cm), während der Cv2-Horizont mehrheitlich aus Grobskelett (5-20 cm) aufgebaut wird. Der Gesamtskelettgehalt wird bei beiden auf 20 -50 % geschätzt. Die Korngrößenverteilung wurde nur von Ah und Cv1 im Labor bestimmt. Bei beiden Horizonten überwiegt der Sandanteil klar. Interessant ist besonders der kleinere Tonanteil im Ah-Horizont gegenüber dem Cv1. Diese anormale Korngrößenverteilung ist typisch für alpine Rohböden.

Tabelle 34: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N37

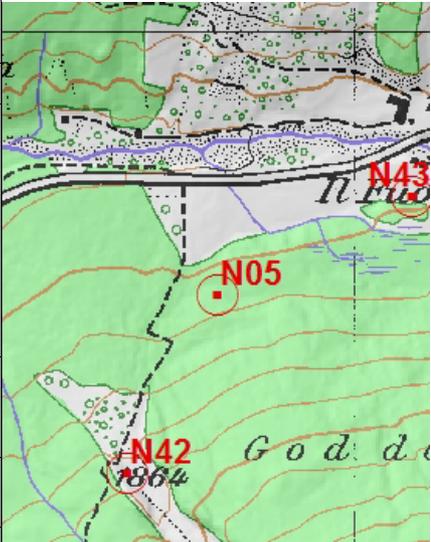
Horizontbezeichnung		Ah	Cv1	Cv2
Probeentnahmetiefe (cm)		0-3	5-15	-
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	74	63	-
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	20	22	-
	Ton (< 0.002 mm) (%)	6	15	-
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		10-20	20-50	20-50
Feinskelettgrösse (geschätzt) (%)		> 75	> 75	>25
Humusgehalt (geschätzt) (%)		5-10	0	0
pH (CaCl ₂)		4,2	3,9	-
C _{org} (%)		8,7	0,8	-
C _{anorg} (%)		-	-	-
N _{tot} (%)		0,55	0,08	-
C/N-Verhältnis		17	10	-

4.1.9 Profil N05: Eisen-Podsol

Profil N05 befindet sich auf einem mässig steilen Nordhang in einem lückigen Waldbestand, der aus Bergföhren, Lärchen und Fichten besteht. Die Kraut- und Strauchschicht bilden vorwiegend Heidelbeeren (*Vaccinium myrtillus*), Erika (*Erica carnea*) und Torfmoose (*Sphagnum*). Das Ausgangsgestein besteht zu mindestens 95 % aus Verrucanoschutt. Der kleine Dolomitanteil stammt von den Vallatscha- und Turettadolomiten, die weit oberhalb

des Standortes am Munt la Schera anstehen. Einzelne leicht schiefe Bäume lassen darauf schliessen, dass geringe Hangbewegungen vorkommen, ansonsten wird die Bodenbildung kaum gestört.

Tabelle 35: Standorteigenschaften von Profil N05

Profilnummer	N05	
Bodentyp	Eisen-Podsol	
Humusform	Typischer Moder (Humusformindex = 0,625)	
Bodeneignungskarte	R4	
Vegetation	Gemischter Baumbestand mit ungefähr 50 % aufrechten Bergföhren (<i>Pinus mugo uncinata</i>), 25 % Lärchen (<i>Larix decidua</i>) und 25 % Fichten (<i>Picea abies</i>). Zusätzlich Heidelbeere (<i>Vaccinium myrtillus</i>), Waldwachtelweizen (<i>Melampyrum sylvestris</i>), Erika (<i>Erica carnea</i>), Torfmoose (<i>Sphagnum</i>) und diverse Gräser	
Geologie / Substrat	95 % Verrucanoschutt (Chazfora-Formation), 5 % Dolomitschutt (Vallatscha-Dolomit)	
Geomorphologie	Leicht schiefe Bäume lassen auf geringe Hangbewegungen schliessen.	
Höhe ü. M.	1808 m	
Neigung	25 %	
Geländeform	Mässig steiler Hang	
Exposition	N	

Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

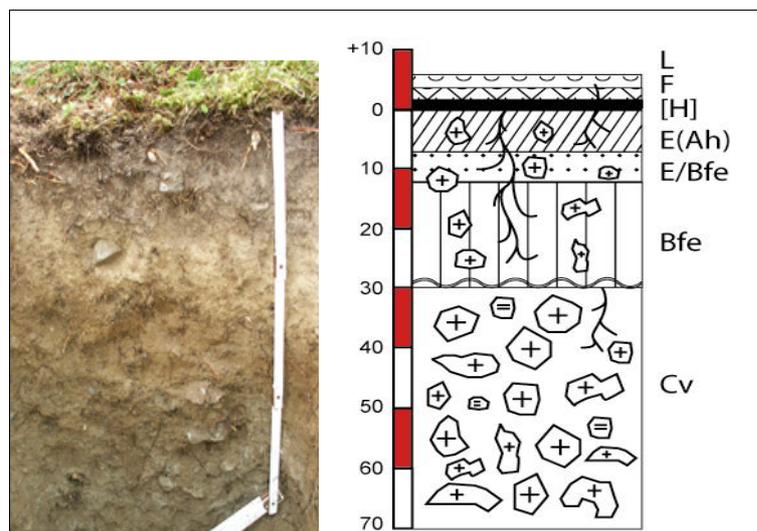


Abbildung 45: Photo und Skizze von Profil N05

Die Auflagehorizonte L-F-[H] erreichen zusammen eine Mächtigkeit von 4 -5 cm, wobei der Humusstoffhorizont nicht überall nachgewiesen werden konnte. Gemäss dem berechneten Humusformindex von 0,625 und der Abfolge der Auflagehorizonte wird die Humusform somit als typischer Moder klassifiziert. Das mässig weite C/N-Verhältnis des obersten Mineralerdehorizontes E(Ah) und der hohe Anteil an Nadelstreu bestätigt, dass die Zersetzung der

organischen Substanz nur langsam vorgeht. Unter der Auflage befindet sich ein schwach humoser E(Ah)-Horizont, der im Verhältnis zum Unterboden locker gelagert ist. Die Eisen- und Aluminiumoxide werden mit metallorganischen Komplexen in tiefere Bereiche des Bodens verlagert. Im E/Bfe-Horizont lassen sich neben Auswaschungszonen bereits rostbraun gefärbte Anreicherungsbereiche feststellen. Darunter, im Bfe-Horizont, nimmt die Anreicherung der Oxide stark zu, was an der intensiv rostbraunen Farbe gut zu erkennen ist.

Der pH-Wert des obersten Horizontes liegt mit 4,4 im stark sauren Bereich, nimmt mit der Tiefe zu und erreicht im Gesteinshorizont Cv neutrale Verhältnisse. Die Kalkgrenze liegt ungefähr in 30-35 cm Tiefe, darunter reagiert die Feinerde mässig stark mit Salzsäure. Die pH-Werte stimmen mit den beobachteten Podsolierung gut überein. Im stark sauren Bereich werden die Oxide mobilisiert, während sie im schwach sauren Bereich aufgrund der höheren Basensättigung wieder ausgefällt werden.

Der Sandanteil der Feinerde ist im ganzen Profil mit ungefähr 70 % sehr hoch. Der Tonanteil nimmt im Bodenprofil entsprechend des abnehmenden Verwitterungsgrades mit der Tiefe von 9 % auf 4 % ab. Diese Korngrößenverteilung mit hohen Sand- und geringen Tonanteilen ist im Allgemeinen typisch für alpine Podsole (vgl. dazu Blaser et. al., 2005).

Interessant ist die Durchwurzelungsdichte der Feinwurzeln, die im E(Ah)-Horizont intensiv und im darunter liegenden dichter gelagerten E/Bfe merklich abnimmt. Im Bfe-Horizont steigt die Zahl der Wurzeln wieder an, da auch die Lagerungsdichte wiederum etwas abnimmt. Grobwurzeln (2 bis 20 mm) lassen sich nur in den oberen beiden Auswaschungshorizonten beobachten.

Tabelle 36: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N05

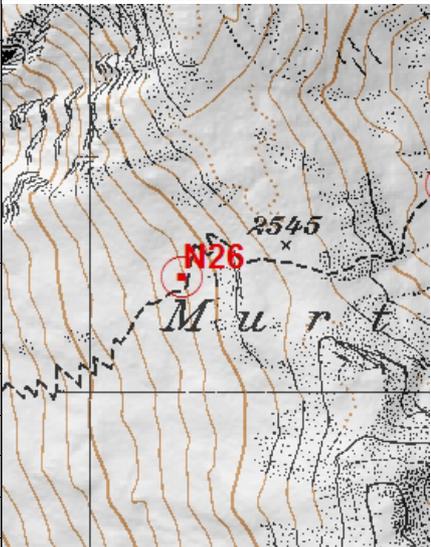
Horizontbezeichnung		E(Ah)	E/Bfe	Bfe	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)		0-7	7-15	20-30	55-65
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	69	67	74	73
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	22	23	21	24
	Ton (< 0.002 mm) (%)	9	9	5	4
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		10-20	10-20	20-50	20-50
Humusgehalt (geschätzt) (%)		2-5	0	0	0
pH (CaCl ₂)		4,4	5,5	6,2	7,0
C _{org} (%)		2,6	1,4	2,2	-
C _{anorg} (%)		-	-	-	-
N _{tot} (%)		0,12	0,08	0,08	<0,03
C/N-Verhältnis		20	18	26	-

Die vorliegenden Standortverhältnisse sind typisch für die Bildung eines Podsols, da Podsole im Alpen vorwiegend unter Nadel- oder Zwergstrauchvegetation vorkommen und die feuchtkalte Nordexposition die Podsolierung zusätzlich begünstigt. Zudem stellt ein hoher Sandanteil eine gute Voraussetzung für den Ablauf einer Podsolierung dar, da solche Böden eine allgemein gute Durchlässigkeit aufweisen. (Scheffer, 2002).

4.1.10 Profil N26: Saure Braunerde

Profil N26 befindet sich oberhalb der Waldgrenze auf 2476 Meter am Westhang des Passüberganges zwischen dem Val Cluozza und dem Val dal Spöl. Geologisch liegt es in der Kössen-Formation, die aus dunklen Schiefertönen und gelblichen fossilreichen Kalk- und Dolomitbänken besteht. Das Ausgangsgestein am Profilstandort besteht zu mindestens 90 % aus Schiefertönen. Der Dolomitanteil ist sehr gering und stammt von den oberhalb gelegenen Dolomitvorkommen. Der mässig steile Hang wird vollständig von einer alpinen Magerwiesenvegetation bedeckt, die von Gämsen, Hirschen und Steinböcken intensiv beweidet wird.

Tabelle 37: Standorteigenschaften von Profil N26

Profilnummer	N26	
Bodentyp	Saure Braunerde	
Humusform	Mull	
Bodeneignungskarte	U7	
Vegetation	Alpine Magerwiese, die von Wild beweidet wird. Einzelne Arten wurden nicht bestimmt.	
Geologie / Substrat	Ungefähr 90 % dunkle Schiefertone und 5 % Dolomite der Kössenformation.	
Geomorphologie	Inaktiver Wiesenhang	
Höhe ü. M.	2476 m	
Neigung	40 %	
Geländeform	Mässig steiler Hang	
Exposition	W	
Besonderes	-	

Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

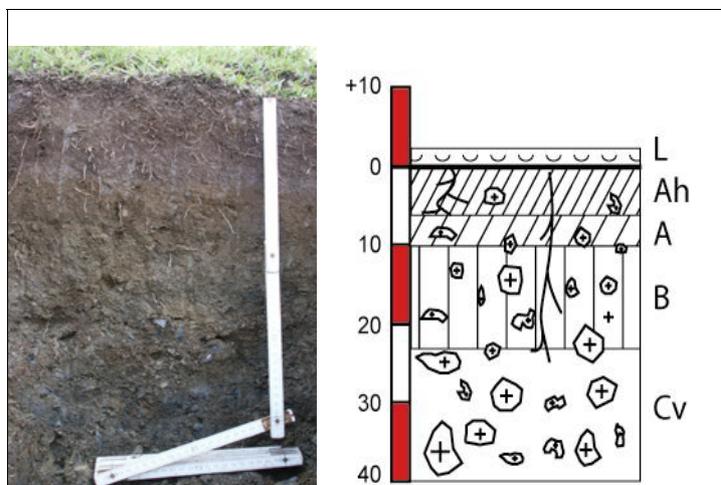


Abbildung 46: Photo und Skizze von Profil N26

Die Horizontabfolge L-Ah-A-B-Cv ist typisch für eine Braunerde. Die Streuauflage geht in einen 6 cm mächtigen Ah-Horizont über. Eine Fermentations- oder Humusstoffauflage fehlt

völlig, da die Begehung durch das Wild die Vermischung mit den mineralischen Horizonten fördert. Dies zeigt sich auch in den Humusgehalten, welche mit zunehmender Tiefe kontinuierlich abnehmen, und im mässig engen C/N-Verhältnis des Ah- und A-Horizontes.

Die pH-Werte sind tief, nehmen jedoch erwartungsgemäss gegen unten etwas zu. Es wurde auch keine Wurmtätigkeit festgestellt, da das Milieu für Würmer und andere wühlende Bodenorganismen wahrscheinlich zu sauer ist.

Der Oberboden ist aufgrund der Beweidung und der fehlenden Bioturbation etwas verdichtet. Da keine Staunässemerkmale beobachtet werden konnten, wird die Perkolation durch diese Verdichtung aber nicht behindert. Es besteht eine gewisse Wasserspeicherkapazität, die aber im Vergleich mit Talböden immer noch als gering erachtet werden kann. Der Skelettgehalt im Oberboden ist mit weniger als 5 % sehr gering einzustufen, nimmt mit der Profiltiefe aber zu.

Tabelle 38: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N26

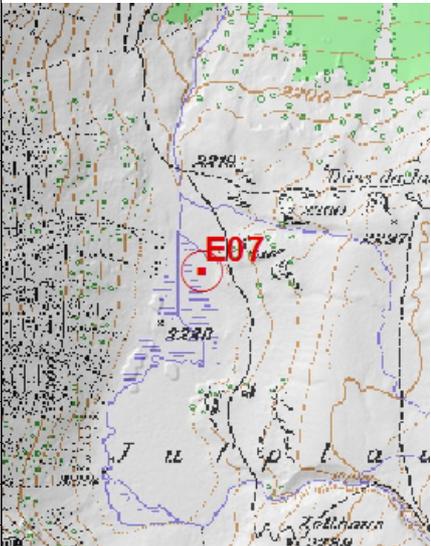
Horizontbezeichnung	Ah	A	B	Cv
Probeentnahmetiefe (cm)	0-5	6-10	10-20	30-40
Körnung (geschätzt)	Sand (0.06-2 mm) (%)	20-70	20-70	20-70
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	10-50	10-50	10-50
	Ton (< 0.002 mm) (%)	20-30	20-30	20-30
Skelettgehalt (geschätzt) (%)	0-5	0-5	10-20	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)	5-10	2-5	< 2	0
pH (CaCl ₂)	3,4	3,5	3,8	5,2
C _{org} (%)	10,03	6,51	-	-
C _{anorg} (%)	-	-	-	-
N _{tot} (%)	0,75	0,48	-	-
C/N-Verhältnis	13	12	-	-

Profil N26 ist ein gutes Beispiel für eine saure Braunerde im alpinen Raum. Sie ist flachgründig, reagiert sehr sauer und weist eine intensive Verbraunung auf. Inwieweit die frühere Nutzung durch den Menschen und die Beweidung durch das Wild die Bodenentwicklung beeinflusste, ist generell schwierig abzuschätzen. Auch das kleinräumige Nebeneinander von karbonatischen und silikatischen Schichten der Kössen-Formation kann nur grob abgeschätzt werden.

4.1.11 Profil E07: flachtorfiges Halbmoor

Profil E07 liegt im randlichen Bereich einer kleinen Schwemmebene am Fusse des Munt Bufalora auf 2228 Meter über Meer. Der Standort ist durch einflussendes Hangwasser dauernd vernässt, was zur Bildung einer Moorvegetation führt. Das Profil hat sich auf Münstertaler Verrucano gebildet, der in 60 cm Tiefe das Profil begrenzt. Die mineralischen Zwischenschichten bestehen aus silikatischen, alluvialen Sanden und wurden während Überschwemmungen abgelagert. Profil E07 wurde als flachtorfiges Halbmoor klassiert, da nach Fitze (1996) die Torfmächtigkeit kleiner als 90 cm betragen muss und sich mineralische Sedimentschichten zwischen den Torfhorizonten befinden müssen.

Tabelle 39: Standorteigenschaften von Profil E07

Profilnummer	E07	
Bodentyp	Flachtorfiges Halbmoor	
Humusform	Torf	
Bodeneignungskarte	U8	
Vegetation	Moorvegetation mit Torfmoosen (Sphagnum) und diversen Gräsern. Arten wurden nicht näher bestimmt.	
Geologie / Substrat	100 % Münstertaler Verrucano der Chazfo-Formation. Mineralische Zwischenschichten aus alluvialen Sanden.	
Geomorphologie	Kleine Schwemmebene	
Höhe ü. M.	2228 m	
Neigung	3 %	
Geländeform	Randlicher Bereich einer Schwemmebene	
Exposition	-	Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)
Besonderes	Stark von Hangwasser geprägt	

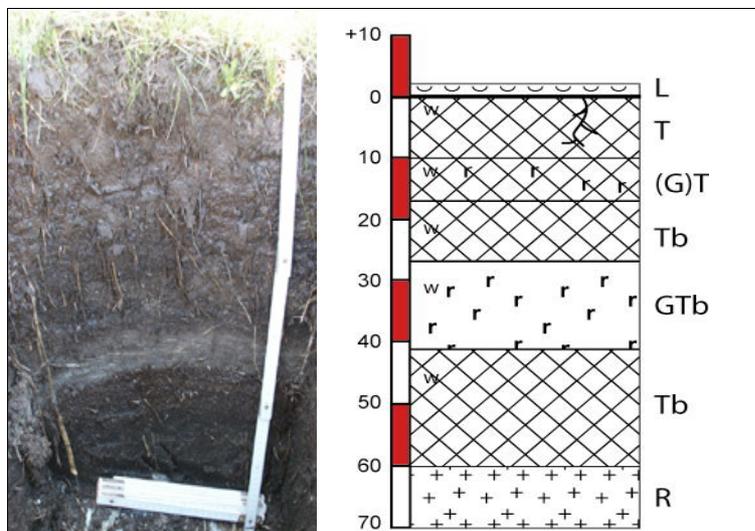


Abbildung 47: Photo und Skizze von Profil E07

Von diesem Profil wurden im Feld aus Zeitgründen nur einige wenige Eigenschaften protokolliert (Express-Profil). Die Horizonte wurden als L-T-(G)T-Tb-GTb-Tb-R angesprochen. Aufgrund der starken und andauernden Vernässung des ganzen Profils stellen sich reduzierende Verhältnisse (Sauerstoffmangel) ein, die eine Zersetzung der abgestorbenen Pflanzenreste in starkem Masse hemmen, so dass sich dadurch ein Torfhorizont bilden kann. Der Humusgehalt aller Torfhorizonte wird mit über 30 % als organisch klassiert. Unter dem obersten T-Horizont befindet sich ein 8 cm ein schwach ausgebildeter mineralischer Zwischenhorizont, dessen geschätzter Humusgehalt von 10-15 % deutlich unter den Torfhorizonten liegt. Nach einer weiteren begrabenen Torfschicht folgt in ungefähr 30 cm Tiefe eine zweite gleyige Zwischenschicht, welche in Abbildung 47 sehr deutlich zu erkennen ist. Dieser GTb besteht aus alluvial abgelagertem Sand, der mit abgestorbenen Pflanzenresten durchsetzt ist. Unter einer weiteren Torfschicht steht schliesslich der Verrucano-Fels an. Die Skelettgehalte der

Torfhorizonte betragen, wenn überhaupt Skelettmaterial vorhanden ist, maximal 5 %, und auch die Gehalte der mineralischen Zwischenschichten liegen mit 5-10 % nicht viel höher.

Die Intensität der Durchwurzelung war schwierig abzuschätzen, da eine Unterscheidung zwischen Wurzeln und nicht zersetzten Pflanzenresten nicht einfach war. In den obersten 5 cm konnten noch viele Wurzeln beobachtet werden, mit der Tiefe nahm deren Dichte jedoch rapide ab. Im GTb-Horizont konnten schliesslich keine Wurzeln mehr nachgewiesen werden.

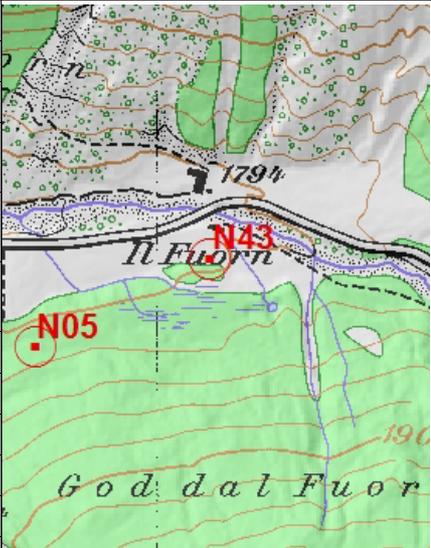
Tabelle 40: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil E07

Horizontbezeichnung	T	(G)T	Tb	GTb	Tb	R
Skelettgehalt (geschätzt) (%)	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	> 75
Anteil Feinskelett (geschätzt) (%)	> 75	> 75	> 75	> 75	> 75	-
Humusgehalt (geschätzt) (%)	> 30	10-15	> 30	2-5	> 30	0
pH (Hellige)	6,0	6,0	-	-	-	-

4.1.12 Profil N43: antorfiger Fahlgley

Profil N43 befindet sich wenige Meter neben dem Rastplatz II Fuorn auf 1799 Meter über Meer. Der Standort weist eine minimale Hangneigung auf und liegt am Fusse eines Hanges. Oberhalb des Profils befindet sich ein kleines Moor, von welchem Wasser in den Hangfuss fliesst. Dies führt zu einer anhaltenden Vernässung des Bodens und zur Ausbildung einer Moorvegetation. Der Standort lag früher wahrscheinlich im Einflussbereich des Fuornbaches. Die feinkörnigen Kalksedimente, die unter dem Torfhorizont zu finden sind, wurden demnach vermutlich alluvial abgelagert.

Tabelle 41: Standorteigenschaften von Profil N43

Profilnummer	N43	
Bodentyp	Antorfiger Fahlgley	
Humusform	Torf	
Bodeneignungskarte	R4	
Vegetation	Stark vernässte Magerwiese. Moorvegetation. Arten wurden nicht näher beschrieben.	
Geologie / Substrat	Feinkörniger, heller Kalkschutt. Wurde vermutlich alluvial abgelagert.	
Geomorphologie	-	
Höhe ü. M.	1799 m	
Neigung	5 %	
Geländeform	Sehr flacher Hang an einer Hangfusslage	
Exposition	W	
Besonderes	Grundwasserstand (Stand am 17.09.04) reicht fast bis zum Torfhorizont.	

Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA067781)

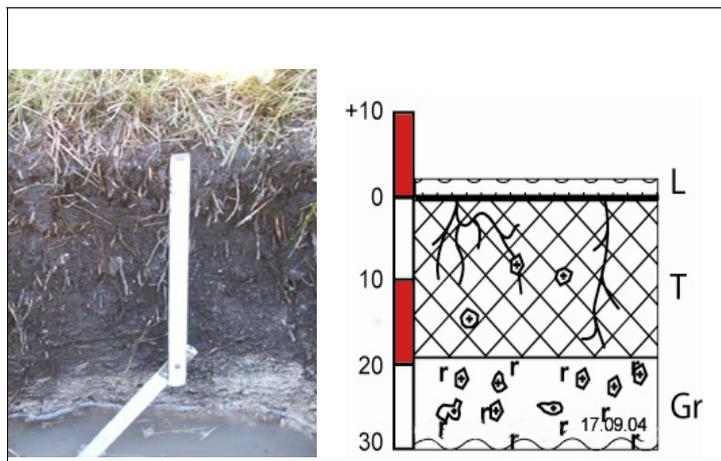


Abbildung 48: Photo und Skizze von Profil N43

Wie schon bei Profil E07 beschrieben wurde, wird die Mineralisierung der Streuauflage L aufgrund des Sauerstoffmangels im Boden stark gehemmt, so dass ein Torfhorizont entsteht. Die Streuzersetzung durch Bodenorganismen tritt folglich stark zurück. Der Humusgehalt wird auf über 30 % geschätzt und der Anteil an organischem Kohlenstoff ist mit 30,9 erwartungsgemäss sehr hoch. Torfhorizonte zeigen oft sehr weite C/N Verhältnisse, was aber in diesem Fall nicht zutrifft. Das enge C/N-Verhältnis ist auf den hohen Stickstoffgehalt im T-Horizont zurückzuführen. Ein Grund für die hohen Stickstoffgehalte konnte nicht gefunden werden. Die Durchwurzelung ist im oberen Teil des T-Horizontes intensiver, nimmt mit der Tiefe ab und endet an der scharfen Grenze zum Gr-Horizont.

Da sich vereinzelt etwas Kalkskelett im Torfhorizont befindet und der Gr-Horizont aus Kalkschutt besteht, reagiert der T-Horizont nur schwach sauer, während der Gr-Horizont erwartungsgemäss leicht alkalisch ist und stark mit HCl reagiert. Wegen des hohen Grundwasserstandes zur Zeit der Aufnahme, war die Ansprache des Gr-Horizontes erschwert. Abbildung 48 zeigt aber sehr schön die reduzierte, bleiche Farbe des Gr-Horizontes.

Da der T-Horizont fast ausschliesslich aus organischen Pflanzenresten besteht, ist der Skelettgehalt mit 0-5 % nur minimal, während der Gr-Horizont mit 50 -75 % sehr skelettreich ist. Die Körnung wurde weder vom T- noch vom Gr-Horizont analysiert.

Tabelle 42: Physikalische und chemische Eigenschaften von Profil N43

Horizontbezeichnung		T	Gr
Probeentnahmetiefe (cm)		0-20	-
Körnung	Sand (0.06-2 mm) (%)	-	-
	Schluff (0.06-0.002 mm) (%)	-	-
	Ton (< 0.002 mm) (%)	-	-
Skelettgehalt (geschätzt) (%)		0-5	50-75
Humusgehalt (geschätzt) (%)		> 30	< 2
pH (CaCl ₂)		5,9	7,6
C _{org} (%)		30,9	-
C _{anorg} (%)		-	12,8
N _{tot} (%)		2,9	0,3
C/N-Verhältnis		10,5	-

Obwohl Profil N43 einen Torfhorizont aufweist, wurde es nicht als Moor oder Halbmoor klassiert, da die Mächtigkeit der Torflage weniger als 40 cm beträgt. Der antorfige Fahlgley mit einem Torfhorizont unter 40 cm bildet eine Übergangsform von den Gleyböden zu den Moorböden.

Der hohe Grundwasserstand zur Zeit der Profilaufnahme erlaubte es nicht, noch tiefer zu graben, um zu sehen, ob sich unter dem Gr-Horizont allenfalls noch weitere Torfhorizonte befinden. In diesem Fall müsste man von einem flachtorfigen Halbmoor sprechen.

4.2 Die Bodentyp-Zugehörigkeitskarten

Wie in Kapitel 3.3.4 aufgezeigt wurde, berechnet das Fuzzy-basierte Modul der terrestrischen Böden für jeden Bodentypen einen Zugehörigkeitswert. Im Folgenden sollen die Bodentyp-Zugehörigkeitskarten am Beispiel der karbonatischen Bodenentwicklungsreihe erläutert werden. Alle Zugehörigkeitskarten stellen in ihrer Gesamtheit den Output des Moduls der Terrestrischen Böden dar, und können somit als Zwischenergebnisse angesehen werden, aus welchen schliesslich die resultierende hypothetische Bodentypenkarte generiert wird (vgl. Kapitel 4.3).

Der Begriff der Zugehörigkeit darf nicht mit der Wahrscheinlichkeit im klassischen Sinne verwechselt werden. Die Wahrscheinlichkeit definiert, wie wahrscheinlich an einem gewissen Standort der jeweilige Bodentyp auftreten könnte. Die Zugehörigkeit eines Bodentypen dagegen beschreibt den Grad des Charakters eines Bodentypen. So sagt beispielsweise eine 70-prozentige Zugehörigkeit zum Bodentypen Rendzina aus, dass an diesem Standort der Boden tatsächlich zu 70 % die Standortcharakteristik einer Rendzina aufweist.

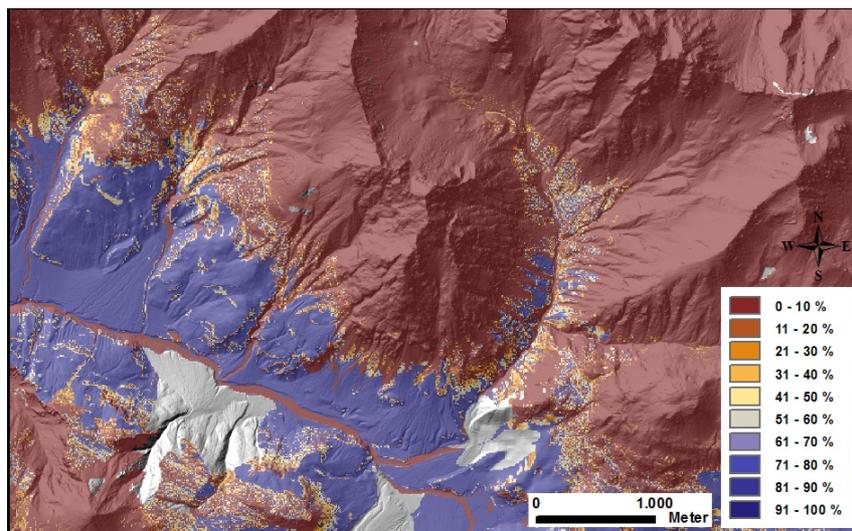


Abbildung 49: Die Rendzina-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)

Die Abbildungen 49 bis 52 zeigen den identischen Geländeausschnitt der jeweiligen Bodentyp-Zugehörigkeitskarten. Der in Abbildung 49 dargestellte Rendzina-Zugehörigkeitsgrad zeigt sehr schön, dass an den bewaldeten Talflanken hohe Zugehörigkeiten zwischen 90 – 100 % modelliert werden. Aufgrund der verhältnismässig starken Gewichtung der Inputvariable *Höhe*, ist eine deutliche Höhenzonalität der einzelnen Bodentyp-Zugehörigkeiten zu beobachten. Im Waldgrenzbereich und auf alpinen Grasheiden nimmt der Zugehörigkeitsgrad der Rendzina ab und erreicht in höheren Gebieten schnell einmal 0 %. Die grau dargestellten Flächen weisen ein silikatisches oder gemischtes geologisches Substrat auf und wurden deshalb bei Modellierung der karbonatischen Böden nicht berücksichtigt.

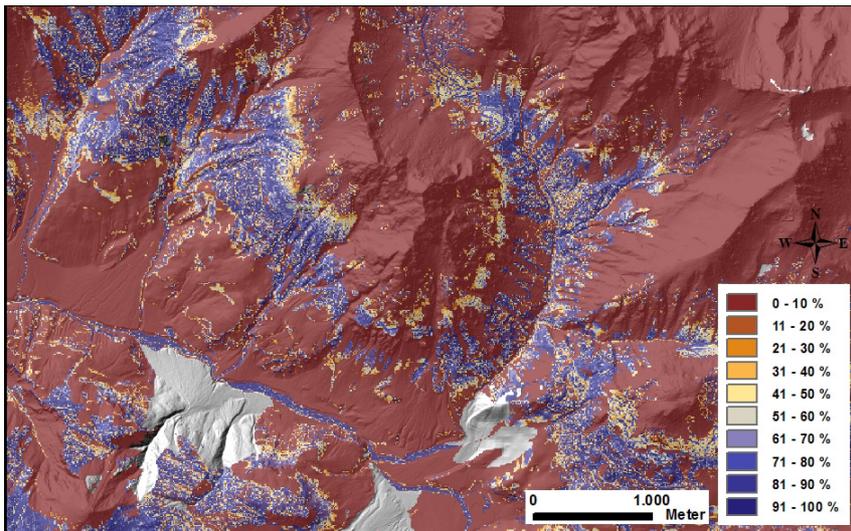


Abbildung 50: Humus-Karbonatgesteinsboden-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)

Bei der Zugehörigkeitskarte des Humus-Karbonatgesteinsboden (HKGB) fällt ebenfalls sofort die Höhenabhängigkeit auf (Abbildung 50). Die höchsten Zugehörigkeiten werden in einem mittleren Höhenbereich erreicht, während diese gegen den Talboden und die Bergspitzen abnehmen. An der Ostflanke des Piz Nair (in der Bildmitte) ist zudem eine geringere Zugehörigkeit gegenüber der ungefähr gleichen Höhenlage zu beobachten. Diese kann aufgrund der steileren Hangneigungen erklärt werden. Der Modellaufbau bringt es mit sich, dass an diesen Stellen logischerweise die Zugehörigkeit zum Karbonatgesteinsboden entsprechend hoch ausfällt (Abbildung 51).

Die grosse HKGB-Zugehörigkeit im Bachbett des Fuornbaches entspricht natürlich in keiner Weise der Realität. Diese fehlerhafte Modellierung wird jedoch in der resultierenden Bodentypenkarte unter Einbezug der Auen-Gesteinsböden berücksichtigt und korrigiert.

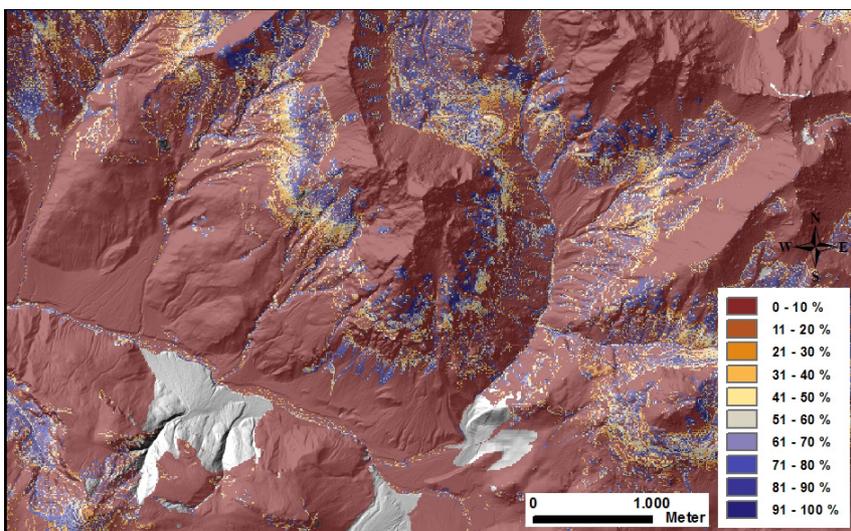


Abbildung 51: Karbonatgesteinsboden-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)

Die Zugehörigkeiten zum Bodentypen *Kein Boden* verdeutlicht Abbildung 52. Grosse Zugehörigkeitsgrade sind erwartungsgemäss in grossen Höhen auf völlig vegetationslosen Flächen

zu finden. Auffällig ist der stellenweise abrupte Übergang von sehr grossen zu sehr kleinen Zugehörigkeiten. Dies hat einmal mehr mit den verfügbaren Datensätzen zu tun. Bei der scharf begrenzten Bodenbedeckungsklasse *Wiese/Weide* geht man im Modell davon aus, dass dort der Bodentyp *Kein Boden* nicht vorkommen kann. Auf der Bodenbedeckungsklasse *Schutt/Fels* geht man hingegen von einer generell grossen Zugehörigkeit zum Bodentyp *Kein Boden* aus.

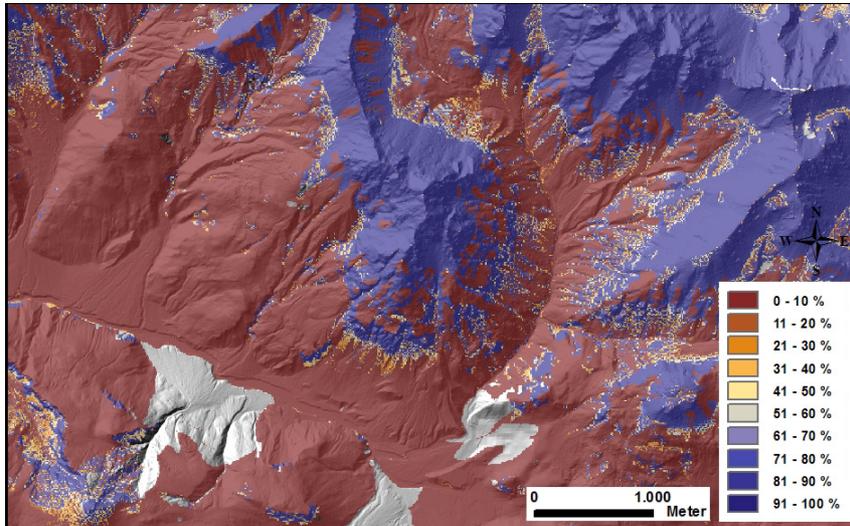


Abbildung 52: : 'Kein Boden'-Zugehörigkeitskarte (Ausschnitt vom Gebiet Buffalora, Piz Nair)

Auf die Visualisierung und Interpretation der silikatischen und gemischten Bodentyp-Zugehörigkeitskarten wird verzichtet, da sich die beschriebenen Verteilungsmuster grundsätzlich nicht gross von den karbonatischen Böden unterscheiden.

Für einen bodenkundlichen Überblick über das ganze Untersuchungsgebiet eignen sich diese Zugehörigkeitskarten nicht sonderlich, da alle Karten gleichzeitig interpretiert werden müssten. Wenn aber beispielsweise nur die Verbreitung eines spezifischen Bodentypen interessiert, kann die entsprechende Bodentyp-Zugehörigkeitskarte nützliche zusätzliche Informationen liefern.

4.3 Die Hypothetische Bodentypenkarte

Die in Abbildung 53 dargestellte resultierende Hypothetische Bodentypenkarte wurde aus den Teilresultaten der einzelnen Module zusammengefügt. Beim Modul der terrestrischen Böden bestimmte jeweils die grösste Zugehörigkeit den resultierenden Bodentypen. Die Bodentypenkarte zeigt somit nur den dominanten Bodentypen an einem Standort an. Man muss sich somit bei der Interpretation bewusst sein, dass die modellhafte Faktorenkombination an einem Standort auch andere Bodentypen nicht ausschliesst, welche mit einer geringeren Zugehörigkeit modelliert werden. Zwecks besserer Interpretation befindet sich die Bodentypenkarte im Anhang im Massstab 1:40'000.

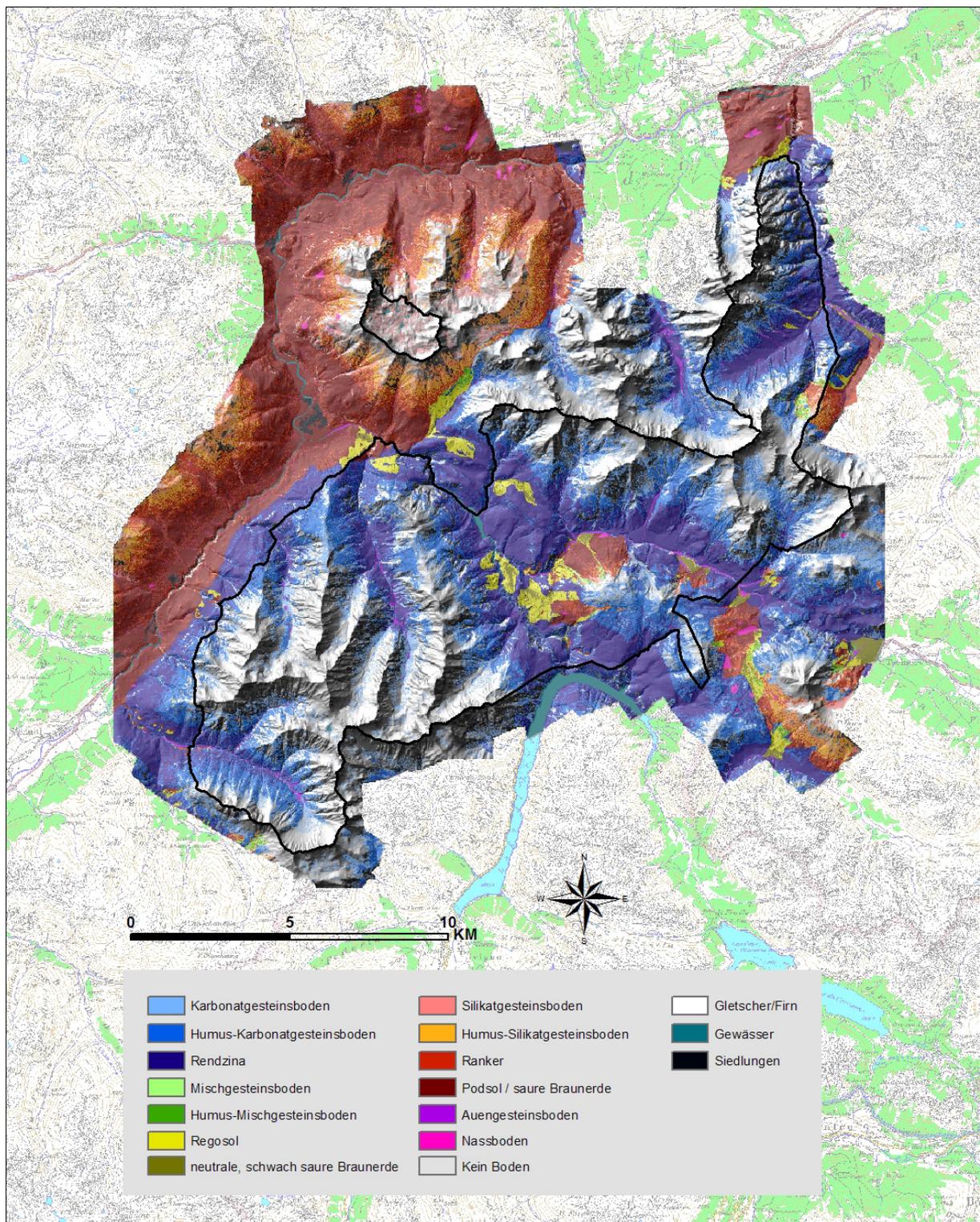


Abbildung 53: Die hypothetische Bodentypenkarte des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).

Von den gesamthaft 426 km² Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes wurden 420,4 km² als potentielle Bodenentwicklungsflächen modelliert. Bei den verbleibenden 5,6 km² handelt es sich um Siedlungen, Gletscher und Firngebiete sowie Gewässer, auf denen sich per se keine Böden entwickeln können. Nennenswerte Siedlungsgebiete finden sich ausschliesslich im

Unterengadin und bedecken eine Fläche von 1,3 km². Die verbleibenden ‚Minigletscher‘ und Firnggebiete machen gerade noch 0,27 % (1,1 km²) der Gesamtfläche aus. Da die Datengrundlage (Primärflächen von Vector25) aus dem Jahr 1997 stammt, dürfte sich der Gletscher- und Firnanteil inzwischen markant verkleinert haben. Die Gewässer machen ungefähr 3,3 km² aus, wobei der Inn sowie die beiden Stauseen Lago di Livigno und der Spölstausee die grössten Gewässerflächenanteile darstellen.

Bei der Interpretation (siehe Abbildung 53) der modellierten Flächen fällt auf den ersten Blick die scharfe Abgrenzung der drei geologischen Substratarten auf, insbesondere die Engadiner Linie, welche die silikatischen Böden im Unterengadin von den vorwiegend karbonatischen Böden des Nationalparks trennt. Die Dominanz liegt ganz klar bei den karbonatischen Böden, welche 37 % (155 km²) der Gesamtfläche bedecken. Im Gegensatz dazu bedecken die silikatischen Böden 27,7 %, und die gemischt silikatisch-karbonatischen Böden machen nur gerade 2,4 % (10 km²) des modellierten Gebietes aus. Diese Flächenanteile werden massgeblich durch die geologische Substratkarte vorgegeben. Der grosse Anteil der silikatischen Böden dürfte in Tat und Wahrheit zugunsten der gemischten Bodenanteile erheblich kleiner ausfallen, wenn eine detailliertere, qualitativ bessere geologische Substratkarte zur Verfügung stehen würde (vgl. Kapitel 3.2.1).

Dem Einflussfaktor *Höhe* wurde bei der Regelbildung ein grösseres Gewicht beigemessen als beispielsweise der *Profile Curvature*. Dieser Umstand spiegelt sich auch deutlich in der Bodentypenkarte wieder. Mit zunehmender Höhe nimmt die Entwicklungsstufe im Allgemeinen ab.

Die in Abbildung 54 farblos dargestellten Gebiete wurden als *Kein Boden* modelliert. Auf diesen Flächen ist prinzipiell eine Bodenentwicklung nicht auszuschliessen, da es sich um Schutthalden und Felswände handelt. Auf diesen Flächen lässt sich jedoch im Moment unter den gegebenen Standortfaktoren keine Bodenbildung beobachten. Dieser „Bodentyp“ bedeckt etwas weniger als ein Drittel (31.81 %) der modellierten Fläche und ist somit mit Abstand am verbreitetsten. Innerhalb der Nationalparks machen diese bodenlosen Flächen sogar 42 % des Nationalparkgebietes aus. Die Verbreitung beschränkt sich mehrheitlich auf sehr hoch gelegene Gebiete mit entsprechend vegetationsfeindlichen Klimaverhältnissen. Die Felsflächen werden vom Modell mit sehr guter Übereinstimmung als *Kein Boden* klassifiziert. Dies verdeutlicht der direkte Vergleich mit den Felsflächen der Landeskarte 1: 25'000. Diese gute Übereinstimmung ist auf die im Regelwerk definierte Kombination von sehr steiler Hangneigung mit der Bodenbedeckungsklasse Schutt/Fels zurückzuführen.

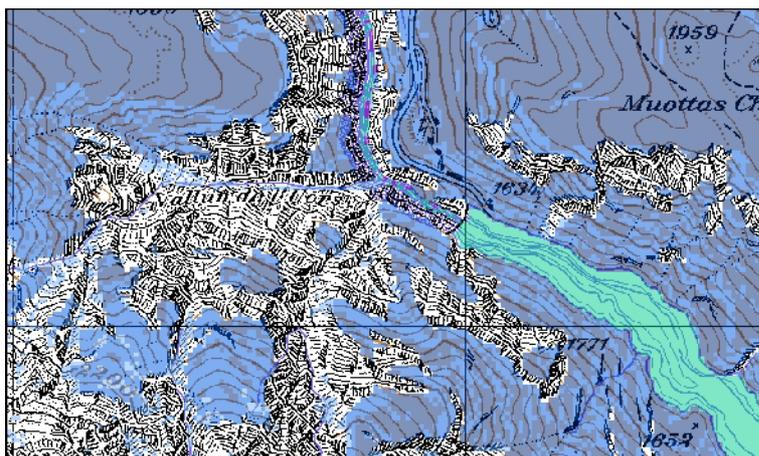


Abbildung 54: Vergleich der 'Kein Boden'-Flächen mit den Felsflächen der Landeskarte 1:25'000 (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781)

Die Böden der Entwicklungsstufe 1, also sämtliche Gesteinsbodentypen (Karbonat- Misch-, Silikat- und Auengesteinsboden) bedecken zusammen eine Fläche von 46,4 km² (11,05 %), wovon der grösste Teil aus Karbonatgesteinsböden besteht. Die Mischgesteinsböden hingegen sind im Gebiet stark untervertreten (0,12 %). Deren Verbreitung beschränkt sich fast ausschliesslich auf die beiden Lavinare ‚Lavinar la Drossa‘ und ‚Lavinar Lad‘ am Nordhang des Munt la Schera. Silikatgesteinsböden innerhalb des Nationalparks finden sich neben einigen kleinen Flächen am Munt la Schera ausschliesslich im Gebiet von Macun.

Die Humus-Gesteinsböden werden mit 15 % an der Gesamtfläche modelliert, wobei die Humus-Karbonatgesteinsböden mit 12 % deutlich dominant sind. Allgemein ist eine enge Vergesellschaftung mit den Gesteinsböden im Feld zu beobachten. Dieser Umstand zeigt sich auch in der modellierten Verbreitung der Humus-Gesteinsböden.

Tabelle 43: Flächenanteile der modellierten Bodenklassen (Entwicklungsstufen) des gesamten Untersuchungsgebiet und innerhalb des Nationalparks

Code	Entwicklungsstufe	Gesamtes Untersuchungsgebiet		Innerhalb des Nationalparks	
		Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche	Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche
0	Kein Boden	133,7	31,81	71,2	42,02
1	Gesteinsböden	46,4	11,05	23,4	13,84
2	Humus-Gesteinsböden	63,1	15,01	30,3	17,90
3	Unentwickelte Böden mit Sekundärmineralien	108,7	25,85	40,4	23,85
4	Entwickelte Böden	66,5	15,82	4,0	2,33
	Nassböden	2,0	0,46	0,1	0,06
	Total modellierte Fläche	420,4	100,00	169,3	100,00

Die unentwickelten Böden mit Sekundärmineralien der Entwicklungsstufe 3 stellen mit 108 km² (25 %) die zweitgrösste Bodenklasse dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sämtliche Rendzinen zu dieser Klasse gezählt werden. Man muss sich im Klaren sein, dass diese Zuordnung nur beschränkt korrekt ist, da verhältnismässig mächtige Rendzinen vom Entwicklungsalter mit Braunerden oder Podsolen verglichen werden können. Die Rendzinen stellen mit 16 % die verbreitetsten Bodentypen im Untersuchungsgebiet dar, was auf Grund der hohen Karbonatgesteinsanteile nicht verwundert.

Bei der vierten Entwicklungsstufe herrscht der modellierte Bodentyp *Podsol/saureBraunerde* mit 15 % vor. Die neutralen Braunerden auf gemischtem Substrat machen hingegen nur gerade 0,69 % der Gesamtfläche aus. Podsole und saure Braunerden sind überwiegend in Waldflächen des Unterengadins zu finden. Innerhalb des Nationalparks finden sich diese Böden vor allem am West- und Nordhang des Munt la Schera, an Stellen, an welchen die silikatische Chazfora-Formation (Müstertaler Verrucano) an der Oberfläche vorkommt.

Die Nassböden machen 0,46 % der Gesamtfläche aus. Innerhalb des Nationalparks beträgt der Anteil sogar nur 0,06 %. Einige grössere Nassbödenstandorte befinden sich in der Umgebung des Unterengadiner Dorfes Guarda und im Gebiet von Buffalora. Die beiden einzigen nennenswerten Vorkommen im Nationalpark befinden sich bei Il Fourn und auf der Alp la Schera, am Westhang des Munt la Schera.

Auch die Verbreitung der Auengesteinsböden ist mit total 2,4 km² oder 0,56 % nur sehr gering. Die modellierten Vorkommen beschränken sich vor allem auf den Nationalpark und kommen dort logischerweise entlang der Bergbäche auf kleinen Schwemmebenen und

Schwemmfächern vor. Im Unterengadin sind die Auengesteinsböden nur entlang des Inn vorhanden.

Tabelle 44: Flächenanteile der modellierten Bodentypen des gesamten Untersuchungsgebiet und innerhalb des Nationalparks

Modellierter Bodentyp	Ganzes Untersuchungsgebiet		Innerhalb des Nationalparks	
	Modellierte Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche	Modellierte Fläche in km ²	Fläche in % zur SNP-Gesamtfläche
Karbonatgesteinsboden	34,4	8,18	20,9	12,32
Humus-Karbonatgesteinsboden	50,9	12,11	29,9	17,66
Rendzina	70,4	16,74	36,5	21,57
Mischgesteinsboden	0,5	0,12	0,3	0,16
Humus-Mischgesteinsboden	0,8	0,19	0,2	0,12
Regosol	5,9	1,40	2,7	1,59
Neutrale/schwach saure Braunerde	2,9	0,69	1,2	0,72
Silikatgesteinsboden	9,2	2,18	1,1	0,63
Humus-Silikatgesteinsboden	11,4	2,72	0,2	0,13
Ranker	32,4	7,71	1,2	0,68
Podsol / saure Braunerde	63,6	15,13	2,7	1,61
Kein Boden	133,7	31,81	71,2	42,02
Auengesteinsböden	2,4	0,56	1,2	0,73
Nassböden	2,0	0,46	0,1	0,06
Total modellierte Fläche	420,4	100,00	169,3	100,00

4.3.1 Validierung anhand der Bodenprofile

Die Validierung des Modells basierte auf drei Vergleichen mit identischer Methodik, wie sie in Kapitel 3.3.7 beschrieben wird. Der gesamte Validierungsprozess stellte ein iteratives Verfahren dar, bei dem versucht wurde, das Modell aufgrund der Validierungsergebnisse zu optimieren. Eine direkte Überprüfung der hypothetischen Bodenkarte im Feld konnte nicht vorgenommen werden, da die Feldarbeiten zeitlich vor der Entwicklung des Modells stattfanden. Eine zusätzliche Feldbegehung könnte mit Sicherheit wertvolle Zusatzinformationen über die Modellierungsgenauigkeit liefern.

Man muss sich bewusst sein, dass es sich bei den folgenden prozentualen Übereinstimmungen nur um eine punktuelle Überprüfung des Modells an 89 Bodenprofilen handelt, und eben nicht um eine flächenhafte Vergleichsstatistik. Da keine genaue Bodenkartierung aus dem Untersuchungsgebiet zur Verfügung stand, musste dieses einfache Validierungsverfahren angewendet werden, im Bewusstsein, dass aufgrund der kleinen Anzahl Vergleichspunkte nur eine beschränkte Aussage über die Modellgüte möglich ist.

Nach einem ersten Modelldurchlauf wurde auf Anhieb eine Übereinstimmung von 52 % erzielt. Diese konnte schliesslich anhand von total sechs Modelldurchläufen auf 58 % Übereinstimmung optimiert werden. In Tabelle 45 ist ersichtlich, dass sich die Abweichungen mit wenigen Ausnahmen innerhalb einer Entwicklungsstufe (8 und 13 %) befinden, oder dass die fehlerhafte, resp. ungenaue geologische Substratkarte für die Abweichung (17 %) verantwort-

lich ist. Bei diesen 15 Bodenprofilen ist eine Übereinstimmung nicht möglich, da beispielsweise Karbonatböden per se nicht auf Mischgestein modelliert werden können. Wenn diese 15 Bodenprofile nicht in den direkten Vergleich einbezogen werden, erhält man eine Übereinstimmung von 70 %, was unter Berücksichtigung der gegebenen Voraussetzungen als recht gute Übereinstimmung gewertet werden kann.

Tabelle 45: Bodentypen-Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit den Bodenprofilen

Abweichung (in Entwicklungsstufen)	Anzahl Bodenprofile	%- Anteil	%-Anteil unter Berücksichtigung der geol. Substratverhältnisse
2 Stufen zu wenig entwickelt modelliert	1	1	1
1 Stufe zu wenig entwickelt modelliert	7	8	9
Bodentyp korrekt modelliert	52	58	70
1 Stufe zu hoch entwickelt modelliert	12	13	16
2 Stufen zu hoch entwickelt modelliert	1	1	1
3 Stufen zu hoch entwickelt modelliert	1	1	1
Profile auf fehlerhafter geologischer Substratkarte	15	17	-
Total korrekt modellierte Bodentypen	52	58	70
Total nicht korrekt modellierte Bodentypen	37	42	30

Da die geologische Substratkarte einen zentralen Schwachpunkt der gesamten Modellierung darstellt, wurde in einem dritten Verfahren nur zwischen den verschiedenen Entwicklungsstufen verglichen. Die Unterscheidung nach Karbonat- Silikat- oder Mischböden wurde folglich nicht berücksichtigt. Tabelle 46 verdeutlicht, dass somit 67 % Profilstandorte korrekt vom Modell abgebildet werden konnten. Vier der gesamthaft 89 Bodenprofile wurden nicht in den Entwicklungsstufenvergleich einbezogen, da es sich um Nassbodenstandorte handelt, die keiner Entwicklungsstufe zugeordnet werden konnten. Auch bei diesem Vergleich bewegt sich die Streuung mit Ausnahme von 5 Bodenprofilen innerhalb einer Entwicklungsstufe.

Tabelle 46: Entwicklungsstufen-Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit den Bodenprofilen

Abweichung (in Entwicklungsstufen)	Anzahl Bodenprofile	%- Anteil
3 Stufen zu wenig entwickelt modelliert	1	1
2 Stufen zu wenig entwickelt modelliert	2	2
1 Stufe zu wenig entwickelt modelliert	10	12
Entwicklungsstufe korrekt modelliert	57	67
1 Stufe zu hoch entwickelt modelliert	13	15
2 Stufen zu hoch entwickelt modelliert	1	1
3 Stufen zu hoch entwickelt modelliert	1	1
Nicht berücksichtigte Bodenprofile	4	-
Total korrekt modellierte Entwicklungsstufe	57	67
Total nicht korrekt modellierte Entwicklungsstufe	28	33

4.3.2 Vergleich mit der Bodeneignungskarte

Wie schon im vorhergehenden Kapitel angedeutet wurde, wäre eine Bodenkarte Voraussetzung für eine verlässliche Validierung der hypothetischen Bodenkarte. Zur besseren Beurteilung der Modellgüte wird in diesem Kapitel die hypothetische Bodenkarte mit der Bodenei-

gungskarte 1:200'000 verglichen. Eine direkte räumliche Vergleichsmethodik, wie sie bei der Validierung mit den Bodenprofilen angewendet wurde, ist hier nicht möglich, da die Bodeneignungskarte innerhalb einer Kartierungseinheit nur eine Auswahl an potentiell möglichen Bodentypen beschreibt. Zudem muss beachtet werden, dass es sich um einen Vergleich mit unterschiedlichen Massstäben handelt. Dies hat zur Folge, dass auch dieser Vergleichsansatz nur beschränkte Aussagen über die Genauigkeit der Bodentypenkarte zulässt. Im Untersuchungsgebiet scheidet die Bodeneignungskarte sechs physiographische Einheiten (U, V, W, S, R, KB) aus, welche in weitere Kartierungseinheiten unterteilt werden. Als Basis für den Vergleich dienen die prozentualen Flächenanteile der modellierten Bodentypen innerhalb jeder physiographischen Kartierungseinheit.

Einheit U: Alpine Kalkberglandschaft

Die Einheit U repräsentiert die alpinen Kalkberglandschaften und stellt mit 148 km² die flächenmässig zweitgrösste Bodeneignungseinheit im Untersuchungsgebiet dar. Das Modell scheidet auf ungefähr drei Vierteln der U-Flächen (74,7 %) jene Bodentypen aus, welche potentiell (gemäss der Bodeneignungskarte) auch auf der Einheit U vorkommen können. Es ist klar, dass die karbonatischen Böden mit grossem Abstand den grössten Flächenanteil ausmachen. Einen Grossteil der restlichen 25 % beinhalten die Bodentypen *Kein Boden* (7,5%) und *Podsol/saure Braunerde* (11%). Diese Unstimmigkeiten können mehrheitlich mit dem starken Generalisierungsgrad der Bodeneignungskarte erklärt werden.

Tabelle 47: Vergleich der hypothetischen Bodentypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit U

Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 148 km ²		
Potentielle Bodentypen gemäss Bodeneignungskarte	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit U in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit U in km ²
Karbonatgesteinsböden	6,7	9,9
Humus-Karbonatgesteinsböden	23,4	34,7
Rendzinen	39,5	58,5
Regosole	3,4	5,1
Neutrale Braunerden	1,2	1,7
Gleye, Moore (Nassböden)	0,5	0,7
Total innerhalb der Einheit U	74,7	110,6

Einheit V: Alpine kristalline Berglandschaft auf Granit, Orthogneisen

Die Einheit V bedeckt eine Fläche von total 67,7 km² des Untersuchungsgebietes und wird als kristalline Berglandschaft auf Granit und Orthogneisen definiert. In dieser physiographischen Einheit können total 78,8 % der Gesamtfläche übereinstimmend vom Modell abgebildet werden. Es verwundert nicht, dass in dieser Einheit fast ausschliesslich silikatische Böden modelliert werden.

Tabelle 48: Vergleich der hypothetischen Bodenypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit V

Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 67,7 km ²		
Potentielle Bodentypen der Einheit V	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit V in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit V in km ²
Silikatgesteinsböden	6,8	4,6
Ranker	31,4	21,2
Saure Braunerden	38,8	26,3
Podsole	vgl. obere Zeile	vgl. obere Zeile
Regosole	0,8	0,5
Phaeozeme	0,0	0,0
Gleye, Moore (Nassböden)	1,1	0,7
Total innerhalb der Einheit V	78,8	53,3

Einheit W: Alpine kristalline Berglandschaft auf Paragneisen

Die Einheit W beschreibt die kristalline Berglandschaft auf Paragneisen, also Gesteinen, die im Gegensatz zu den Graniten und Orthogneisen der Einheit V etwas leichter verwitterbar sind. Die Fläche dieser Einheit beträgt nur gerade 13,1 km² und beschränkt sich auf Gebiete um die Dörfer Lavin und Susch im Unterengadin. Der Übereinstimmungsgrad ist mit 96,2 % sehr hoch, was auf die grossen Flächenanteile der beiden Bodentypen *Podsol/SaureBraunerde* und *Ranker* zurückzuführen ist.

Tabelle 49: Vergleich der hypothetischen Bodenypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit W

Bodeneignungseinheit W (Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 13,1 km ²)		
Potentielle Bodentypen der Einheit W	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit W in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit W in km ²
Silikatgesteinsböden	1,1	0,1
Humus-Karbonatgesteinsböden	0,3	0,0
Ranker	21,2	2,8
Regosole	0,2	0,0
Saure Braunerden	73,4	9,6
Podsole	vgl. obere Zeile	vgl. obere Zeile
Total innerhalb der Einheit W	96,2	12,6

Einheit S: Alpine Flyschlandschaft und Bündnerschiefer.

Die S-Einheit der Bodeneignungskarte repräsentiert die Alpine Flyschlandschaft und Gebiete mit Bündnerschiefer. Die gerademal 2,2 km² grosse S-Fläche besteht dabei ausschliesslich aus Bündnerschiefer. Die gute Übereinstimmung von 94,8 % wird wie bei der W-Einheit durch die Bodentypen *Podsol/SaureBraunerde* und *Ranker* erreicht.

Tabelle 50: Vergleich der hypothetischen Bodenypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit S

Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 2,2 km ²		
Potentielle Bodentypen der Einheit S	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit S in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit S in km ²
Regosole	0,0	0,0
Silikatgesteinsböden	1,0	0,0
Ranker	15,9	0,3
Saure Braunerden	73,8	1,6
Podsole	vgl. obere Zeile	vgl. obere Zeile
Gleye, Moore (Nassböden)	4,2	0,1
Total innerhalb der Einheit S	94,8	2,1

Einheit R: Enge Alpentäler

Die R-Einheit repräsentiert Enge Alpentäler, damit sind im Untersuchungsgebiet Alluvialflächen und Schwemmfächer gemeint. Die Übereinstimmung beträgt 62,6 %, wobei deren 57,6 % von *sauren Braunerden* modelliert wird. Die Auengesteinsböden werden als Teil der Auenböden betrachtet, und machen immerhin 3,7 % der Einheit R aus. Dieser verhältnismässig kleine Anteil ist darauf zurückzuführen, dass die Auenböden mit Ausnahme der Auengesteinsböden nicht im Modell berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 51: Vergleich der hypothetischen Bodenypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit R

Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 13,9 km ²		
Potentielle Bodentypen der Einheit R	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit R in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit R in km ²
Auenböden	3,7	0,5
Regosole	1,3	0,2
saure Braunerde	57,6	8,0
Phaeozeme	0,0	0,0
Total innerhalb der Einheit R	62,6	8,7

Einheit KB: Keine Bodenbildung

Die Einheit *Keine Bodenbildung* ist streng genommen keine physiographische Bodeneignungseinheit, da gemäss der Bodeneignungskarte diese Gebiete mehrheitlich aus vegetationslosen Schutt- und Felsflächen bestehen. Sie macht mit 155 km² die grösste Einheit im Untersuchungsgebiet aus. Im Vergleich mit den *Kein Boden*-Flächen der hypothetischen Bodenkarte wird eine Übereinstimmung von ungefähr 70 % erzielt. Von den restlichen 30 % werden deren 25 % von Gesteinböden bedeckt. Auch hier zeigt der Vergleich eine allgemein gute Übereinstimmung.

Tabelle 52: Vergleich der hypothetischen Bodenypenkarte mit der Bodeneignungs- Einheit KB

Totalfläche im Untersuchungsgebiet = 154,1 km²		
Potentielle Bodentypen der Einheit KB	Flächenanteil der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit KB in %	Fläche der modellierten Bodentypen innerhalb der Einheit KB in km²
Keine Bodenbildung	69,9	107,4
Total innerhalb der Einheit KB	69,9	107,4

4.4 Modellierung anderer Bodeneigenschaften

Im methodischen Teil dieser Arbeit (vgl. Kapitel 3.3.8) wurde bereits die Vorgehensweise zur Modellierung des Oberboden-pH und der Bodenmächtigkeit dokumentiert. Die Datenlage erlaubte einzig diese beiden Bodenparameter auf vernünftige Art herzuleiten. Auf andere nicht modellierte Bodeneigenschaften wie Unterboden-pH, Gründigkeit, Skelettgehalt und Körnung soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Auf eine Modellierung des Unterboden-pH wurde verzichtet, da davon ausgegangen werden kann, dass keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem pH des Ausgangsgesteins und des Unterbodens bestehen. So wird der Unterboden-pH auf karbonatischem und gemischtem Substrat sicherlich im neutralen bis leicht alkalischen Bereich zu liegen kommen.

Unter der pflanzennutzbaren Gründigkeit versteht man die Mächtigkeit des durchwurzelbaren Bodens und damit den Wurzelraum (Walthert et al., 2004). Diese ist in hohem Masse von der Art der Vegetation, der Bodendichte und von Eigenschaften des Ausgangsgesteins (Verwitterungsgrad, Klüftigkeit) abhängig, wobei diese Daten für eine Modellierung nicht zu Verfügung standen. Ausserdem konnte die pflanzennutzbare Gründigkeit bei vielen Bodenprofilen nicht genau bestimmt werden, da die gegrabene Profiltiefe eine Bestimmung der pflanzennutzbaren Gründigkeit nicht zulies.

Die mineralischen Bodenbestandteile mit einem Partikeldurchmesser > 2 mm werden als Skelett bezeichnet (Walthert, 2004). Der an der Profilwand abgeschätzte Skelettgehalt ist relativ ungenau, weil die Ansprache nur zweidimensional an der Profilwand erhoben werden kann. Aufgrund des grossen Unsicherheitsfaktors bezüglich dieser Abschätzung wurde auf eine Herleitung des Skelettgehaltes verzichtet.

Die mineralischen Bestandteile mit einem Partikeldurchmesser < 2 mm werden als Feinerde bezeichnet, wobei die drei Hauptfraktionen Sand, Schluff und Ton unterschieden werden.

Dieser Bodenparameter ist stark abhängig von der Mineralogie und Verwitterungsanfälligkeit der Ausgangsgesteine, also von Faktoren, zu denen keine Datensätze vorhanden waren. Zusätzlich standen nur von wenigen Profilen Labormessungen zur Verfügung, welche aber nicht ausreichten, um die Körnung der Feinerde herzuleiten.

4.4.1 Der gemittelte Oberboden-pH

Der Oberboden-pH wird mit Hilfe empirisch definierten Regressionsfunktionen aus der Bodentypenkarte abgeleitet. Diese in Kapitel 3.3.8 beschriebene Herleitungsmethodik soll ein Modellansatz darstellen, wie auf einfache Weise der pH des Oberbodens abgeschätzt werden kann. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass der Oberboden-pH an einem Standort von einer grossen Anzahl Faktoren beeinflusst wird, welche bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden konnten. Der Oberboden-pH wird jedoch durch die geologischen Substratverhältnisse sowie die allgemeine Bodenentwicklung massgeblich beeinflusst.

Die gezeigten Modellresultate müssen unter Berücksichtigung der Methodik und den gegebenen Voraussetzungen interpretiert werden. Eine Validierung der modellierten pH-Werte war nicht möglich, da die verwendeten Profile zur Herleitung der Funktionen verwendet wurden. Die modellierte Oberboden-pH-Karte ist in Abbildung XX dargestellt.

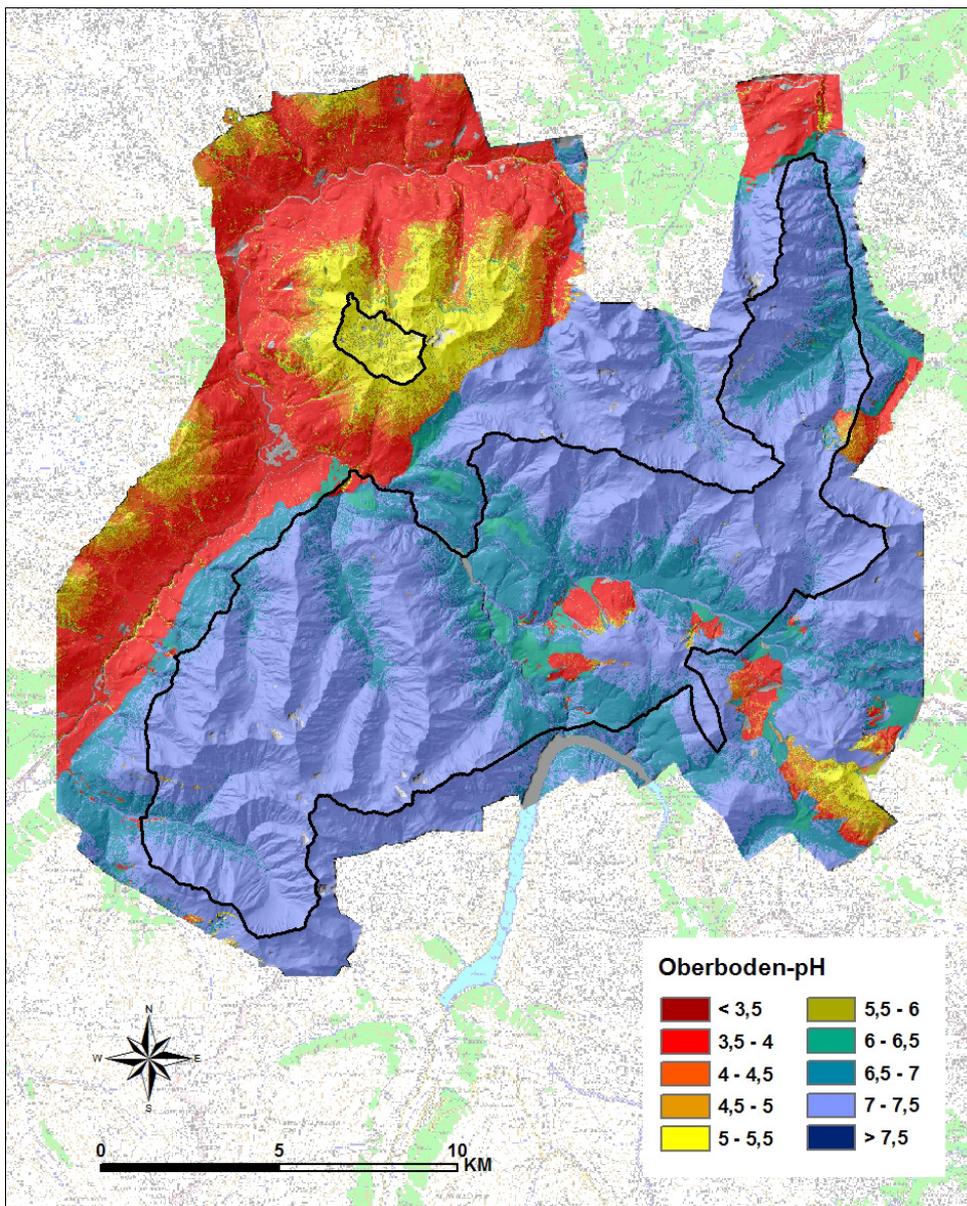


Abbildung 55: Der gemittelte Oberboden-pH des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781)

Mit zunehmender Höhe unter Berücksichtigung der Substratverhältnisse nimmt der pH generell zu. In tieferen Lagen mit karbonatischen Böden und geschlossener Vegetationsdecke liegen die pH-Werte im schwach sauren bis neutralen Bereich (6,5- 7), während sie auf Mischgesteinen noch etwas saurer (6 – 6,5) modelliert werden. Es ist klar, dass auf silikatischen Böden die pH-Werte im sauren Bereich (3,5 – 5,5) zu liegen kommen. In Tabelle 53 sind die prozentualen Flächenanteile der pH-Klassen aufgelistet, welche eine zweigipflige Verteilung erkennen lässt. 64,3 % der Gesamtfläche weisen einen schwach sauren bis leicht alkalischen Oberboden aus, während weitere 16,9 % als stark saurer Oberboden modelliert werden. Im mässig sauren Bereich (pH 5 – 6) sind die Flächenanteile verhältnismässig gering.

Tabelle 53: Flächenanteile der pH-Klassen des gesamten Untersuchungsgebietes und innerhalb des Nationalparks

pH-Klassen	Gesamtes Untersuchungsgebiet		Innerhalb des Nationalparks	
	Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche	Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche
< 3,5	1,5	0,3	0,0	0,0
3,5 – 4	72,1	16,9	3,1	1,8
4 -4,5	21,3	4,9	0,7	0,4
4,5 – 5	9,7	2,2	0,2	0,1
5 - 5,5	22,9	5,3	3,0	1,7
5,5 – 6	7,1	1,6	0,9	0,5
6 -6,5	9,2	2,1	4,0	2,3
6,5 – 7	69,1	16,2	35,6	20,8
7 - 7,5	205,3	48,1	121,6	71,3
7,5 – 8	0,2	0,0	0,1	0,0
nicht modelliert	7,8	1,8	1,1	0,6
Total	426,1	100,0	170,3	100,0

4.4.2 Die gemittelte Bodenmächtigkeit

Die gemittelte Bodenmächtigkeit wurde nach der gleichen Methodik wie der Oberboden-pH anhand von empirischen Zuordnungsfunktionen hergeleitet. Als Bodenmächtigkeit wurde die Tiefe bis zur Obergrenze des Gesteinshorizontes definiert (siehe Kapitel 3.3.8).

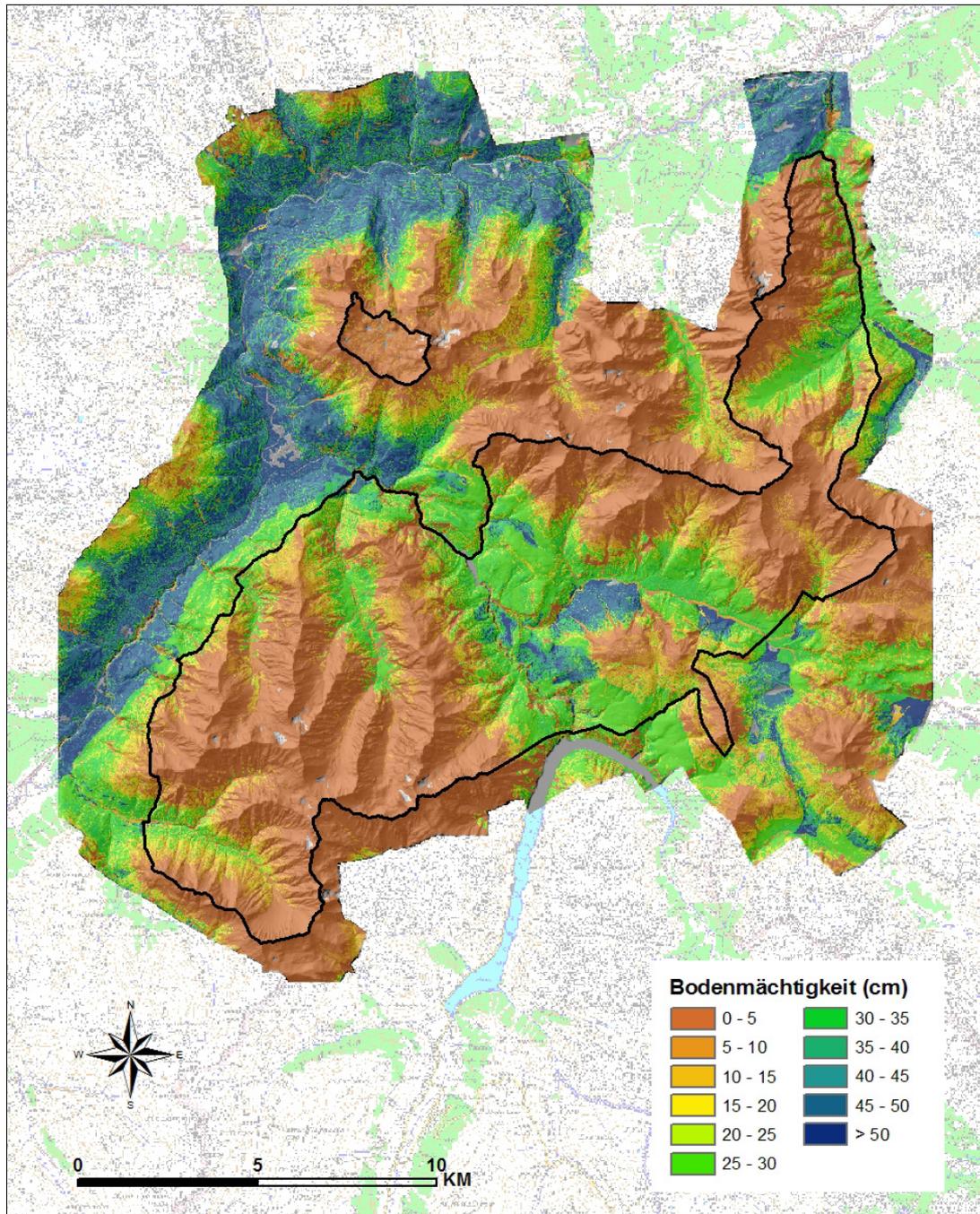


Abbildung 56: Die gemittelte Bodenmächtigkeit des gesamten Untersuchungsgebietes (Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo, BA067781).

Da die Bodenmächtigkeiten aus den modellierten Bodentypen abgeleitet wurden, ist ebenfalls eine klare Höhenabhängigkeit in Abbildung 56 ersichtlich. Böden auf gemischtem und silikatischem Substrat werden gegenüber den karbonatischen Böden generell um bis zu 20 cm mächtiger modelliert, dies aufgrund der steiler definierten empirischen Funktionskurven (vgl. Abbildung 34) und der Tatsache, dass bei diesen Böden oft Unterbodenhorizonte (B-Horizonte) existieren.

Die Tabelle 54 zeigt die Flächenanteile der Bodenmächtigkeitsklassen im gesamten Untersuchungsgebiet sowie nur innerhalb des Nationalparks. Auf 44,1 % des Untersuchungsgebietes und auf sogar 59 % der Nationalparkfläche beträgt die Bodenmächtigkeit maximal 10 cm. Dabei handelt es sich um Gebiete ohne Bodenbildung oder aber um Rohbodenstandorte.

Tabelle 54: Flächenanteile der Bodenmächtigkeits-Klassen des gesamten Untersuchungsgebietes und innerhalb des Nationalparks

Bodenmächtigkeit (cm)	Gesamtes Untersuchungsgebiet		Innerhalb des Nationalparks	
	Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche	Fläche in km ²	Fläche in % zur Gesamtfläche
0 - 10	188,1	44,1	100,4	59,0
10 - 20	52,0	12,2	23,6	13,9
20 - 30	72,7	17,1	29,0	17,0
30 - 40	37,9	8,9	11,7	6,8
40 - 50	43,9	10,3	2,8	1,6
> 50	23,8	5,6	1,7	1,0
nicht modellierte	7,8	1,8	1,1	0,6
Total	426,1	100,0	170,3	100,0

4.5 Allgemeine Diskussionspunkte zur Modellierung

4.5.1 Bodenkundliches Grundlagewissen im Untersuchungsgebiet

Eine grundsätzliche Problematik bestand darin, dass trotz einiger bodenkundlicher Studien das Wissen über den Einfluss der Standortfaktoren und deren Gewichtung im Untersuchungsgebiet nur sehr gering ist. Joasis Braun-Blanquet und Hans Pallmann (Braun-Blanquet et al. 1954 und 1926) gliederten ihre bodenkundlichen Untersuchungen im Nationalpark mehrheitlich nach pflanzensoziologischen Kriterien, in dem sie die Böden unter einzelnen Pflanzengesellschaften untersuchten. Das Fehlen einer genauen Vegetationskartierung im Untersuchungsgebiet verunmöglichte eine Herangehensweise bei der Modellentwicklung über die Vegetationsgesellschaften. Somit konnte die enge Beziehung zwischen Vegetation und den Böden bei der Modellbildung nur ungenügend Rechnung getragen werden.

Der Einfluss von anderen Standortfaktoren wie beispielsweise der Geländeform oder der Neigung auf die Bodenbildung sind im Gebiet des Nationalparks noch nicht spezifisch untersucht worden. Auch die im Rahmen dieser Arbeit gemachten Feldarbeiten konnten nur einen verhältnismässig kleinen Beitrag zu einem besseren Verständnis über die Bodenbildungsfaktoren im Untersuchungsgebiet leisten. Es ist durchaus vorstellbar, dass sich eindeutiger Trends mit Hilfe von multivariaten statistischen Methoden ableiten liessen. Dies bedingt jedoch, dass eine genügend grosse Anzahl an Bodenprofilen oder eine Bodenkartierung zur Verfügung stehen würde.

Auf dieser Basis war es schwierig ein wissenschaftlich fundiertes Bodenmodell für den Nationalpark zu entwickeln, so beruht das bodenkundliche Wissen zu einem wesentlichen Teil auf verallgemeinerten Annahmen und Rahmenbedingungen.

Eine weitere Schwierigkeit bereitete die Differenzierung und Benennung der Bodentypen im Feld. Die Ansprache der Bodenprofile ist häufig von der Erfahrung und dem Wissen des Bodenkundlers abhängig und daher nie ausschliesslich nach objektiven Bestimmungskriterien messbar. Hinzu kommt, dass die Nomenklatur der Böden in Hinblick auf die Modellbildung zum Teil etwas generalisiert und vereinfacht werden musste. So war es beispielsweise nicht möglich, aufgrund der zur Verfügung stehenden Datensätze eine Differenzierung von Podsolen und sauren Braunerden vorzunehmen (vgl. Kapitel 3.3.4).

Wie bereits erwähnt wurde, basiert die Nomenklatur der Böden nicht auf physikalischen Eigenschaften, sondern auf interpretierten morphologischen Merkmalen. Eine physikalische und prozessorientierte Herangehensweise bei der Modellierung der Bodentypen war somit nicht möglich. Daher wurde ein heuristischer, also erkenntnistheoretischer Ansatz verwendet, der mehr auf qualitativen Erkenntnissen als auf statistischen Analysen beruht. Folglich und aufgrund der beiden Tatsachen, dass das vorhandene bodenkundliche Wissen nicht in klar definierter Form vorliegt und dass Bodentypen ein kontinuierliches Naturphänomen darstellen, wurde eine Modellmethodik auf Basis der Fuzzy-Logik gewählt.

4.5.2 Vor- und Nachteile des Fuzzy-basierten Modellansatzes

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell stellt sicherlich einen interessanten Ansatz zur Modellierung von Bodentypen und Bodeneigenschaften dar. Im Folgenden sollen einige bedeutende Vor- und Nachteile bei der Verwendung von Fuzzy-Logik aufgezeigt werden.

Einen Vorteil, der für diese Arbeit besonders wichtig war, beschreibt Zimmermann (1993) folgendermassen: „Fuzzy-Logik kommt meist da zum Einsatz, wo das zur Problemlösung benötigte Wissen nur sehr ungenau ist oder, bedingt durch die Komplexität des betrachteten Systems, unstrukturiert vorliegt. Es wird auf mathematische Modellierung des Systems verzichtet und viel mehr versucht, das menschliche Entscheidungsverhalten nachzubilden. Fuzzy-Systeme erlauben die heuristische Abbildung menschlichen Wissens zur Problemlösung.“ Dieser Punkt bezieht sich vor allem auf die Definition der Modellregeln, welche nicht über statistische Analysen erfolgen konnte. Die Regelbildung basiert zu einem grossen Teil auf Felderfahrungen und theoretischen Annahmen. Mit der Verwendung von linguistischen Variablen (Fuzzy-Klassen) war es möglich, diese Erfahrungen und Vermutungen über die Bodenbildung systematisch in einem Modell (als Regeln) zu implementieren. Die Verwendung der natürlichen Sprache in Form von einfachen Wenn-Dann-Regeln lässt folglich eine klare Nachvollziehbarkeit und Transparenz bei der Modellbildung zu.

Ein zweiter für diese Arbeit ausschlaggebender Vorteil ist nach Burrough (1989) die bessere Abbildung von Grenzverläufen. In der Realität kontinuierlich auftretende Phänomene werden im Modell realistischer durch graduelle Übergänge zwischen den Klassen beschrieben, als dies mit scharfen Grenzverläufen möglich wäre. Dieser Umstand konnte im vorliegenden Modell jedoch nur beschränkt ausgenutzt werden, da die geologische Substratkarte sowie die Bodenbedeckung nicht als kontinuierliche Datensätze zu Verfügung standen und somit auch keine Fuzzy-Klassierung dieser Inputparameter möglich war. So zeigen beispielsweise die Zugehörigkeitskarten (Abbildungen 49 bis 52), dass der Übergang von karbonatischen zu silikatischen Böden nicht kontinuierlich modelliert werden konnte. Aufgrund dieser Tatsache musste für jede Kombination von geologischem Substrat und Bodenbedeckung ein eigenes Regelwerk (Submodule) programmiert werden.

Die Fuzzy-basierte Berechnung des resultierenden Bodentyps mit Hilfe der Schwerpunkte (Defuzzifikation) zeigt gegenüber einer Booleschen Modellierung einen weiteren Vorteil. Während dort genau eine Modellregel über den Bodentypen entscheidet, findet bei der Defuzzifikation eine gewichtete Entscheidungsfindung statt, bei welcher mehrere Modellregeln über den resultierenden Bodentypen entscheiden (vgl. Kapitel 3.3.4).

Einer der Nachteile von Fuzzy-basierten Systemen liegt in der Tatsache, dass oftmals das Resultat die Methodik rechtfertigt. Generell kann man sagen, dass in der unscharfen Logik das erreichte Ergebnis zählt; das erzielte Resultat rechtfertigt die Wahl der Vorgehensweise (Traeger, 1993). Somit ist eine Gesamtbeurteilung über die angewandten Berechnungsverfahren im vorliegenden Fall schwierig, da keine stichfeste Überprüfung der Modellresultate möglich war. Die Anwendung einer anderen Defuzzifikationsmethode oder die Verwendung anderer Inferenzoperatoren (Minimum-Maximum-Methode) hätte vielleicht bessere Resultate ergeben.

Die gleiche Problematik stellte sich bei der Fuzzifizierung, also der Definierung der Fuzzy-Klassen. Während bei einer scharfen Klassifikation genau ein Wert die Klassengrenze definiert, wird bei der Fuzzy-Klassifikation der Übergangsbereich durch die Form und die Grenzpunkte der Zugehörigkeitsfunktionen bestimmt. Ebenso standen keine standardisierten Verfahren zur Bestimmung der Anzahl Klassen für die einzelnen Inputparameter zur Verfügung. Sämtliche Inputparameter wurden nach drei Klassen klassifiziert, es hätten jedoch ebenso vier oder fünf Klassen sein können. Diese bewusst gewählte Beschränkung auf drei Klassen pro Parameter basierte auf der Tatsache, dass das bodenkundliche Wissen und die Erfahrungen nicht detailliert genug waren, um noch mehr Klassen unterscheiden zu können. Zudem hätte eine grössere Anzahl Klassen zu einer enormen Erweiterung des Regelwerkes geführt, was das Modell als Ganzes aufwändiger und unübersichtlicher gemacht hätte.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung von Fuzzy-Logik besteht in der verhältnismässig aufwändigen Modellentwicklung und Programmierung. Gerade die Implementierung der Defuzzifikationsmethode (Schwerpunktberechnung) gestaltete sich sehr zeitintensiv. Je nach Form der Gesamtfläche musste jeweils eine unterschiedliche Anzahl Schwerpunkte von Teilflächen berechnet werden, aus denen sich wiederum der resultierende Gesamtschwerpunkt berechnen liess.

Schliesslich war auch die Einarbeitung in die Denkweise der Fuzzy-Logik nicht einfach. Dass beispielsweise ein Standort nur zu einem gewissen Grad einer Klasse angehört, war bei der Definition der Regeln sicherlich gewöhnungsbedürftig. Während bei scharfen Klassen klare Vorstellungen über die Charakteristik der Klasse vorhanden sind, war die Situation bei Fuzzy-Klassen nicht so einfach vorzustellen.

4.5.3 Qualität und Verfügbarkeit der Datengrundlagen

4.5.3.1 Bodenprofile

Die Verfügbarkeit von bodenkundlichen Informationen in Form von Bodenprofilen stellte für diese Arbeit eine grundlegende Voraussetzung dar. Innerhalb des Untersuchungsgebietes standen im Gesamten 89 Bodenprofile zur Verfügung, welche während drei Feldarbeitsperioden aufgenommen wurden. Diese Profile stellen die einzige bodenkundliche Grundlage für den Aufbau und die Überprüfung des Modells dar, da keine Bodenkarte des Gebietes existiert. Die Protokollierung der Bodenansprache erfolgte mittels des Aufnahmeprotokolls der WSL (WSL, 2001), die Bestimmung des Bodentyps richtete sich nach der Klassifikation der Böden der Schweiz (Fitze et al., 1996). Durch diese systematische Bodenansprache kann die inhaltliche Qualität der Bodenprofile folglich als gut erachtet werden.

Ein grundsätzliches, schon einige Male angesprochenes Problem ist die Anzahl der verfügbaren Bodenprofile. Die 89 Profile stellen eine nur sehr ungenügende Datenbasis für die Modellierung dar. Für eine zuverlässige Analyse der Standortfaktoren mittels multivariater statistischer Methoden wäre eine weitaus grössere Anzahl an Bodenprofilen nötig. In der Arbeit wurden 243 Regeln definiert, welche sämtliche Kombinationen aller Inputklassen repräsentieren. Für eine statistisch abgesicherte Bestätigung einer Modellregel würde ein einzelnes Profil nicht ausreichen, es bräuchte mindestens 5 bis 10 Bodenprofile, um Aussagen über den dominanten Bodentypen auf dieser Faktorenkombination machen zu können. Somit müsste man weit über 1000 Standorte bodenkundlich ansprechen, um jede der 243 Modellregeln empirisch bestätigen zu können.

Ein weiteres Problem stellt die räumliche Verteilung der zur Verfügung stehenden Profilstandorte dar. So existieren im Unterengadin verhältnismässig wenig Profile, während im zentralen Gebiet des Nationalparks die Profildichte weit höher ist (siehe Abbildung 7). Auch die Verteilung der Profile nach der Bodenbedeckung und den geologischen Substratklassen ist nicht optimal. So konnte beispielsweise nur ein einziger Mischgesteins-Standort oberhalb der Waldgrenze angesprochen werden. Es muss jedoch gesagt werden, dass es im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich war, noch mehr Bodenprofile aufzunehmen. Hinzu kam, dass die Auswahl des Standortes an gewisse Bedingungen geknüpft war (vgl. Kapitel 3.1.1).

In einer Erweiterung der bodenkundlichen Datenbasis besteht mit Sicherheit ein grosses Verbesserungspotential, da dadurch das Wissen über die Standortfaktoren erweitert und zusätzlich eine bessere Vergleichsbasis geschaffen würde. Es ist klar, dass eine Erweiterung um 1000 Profilstandorte unter den gegebenen Voraussetzungen völlig unrealistisch ist, aber nur schon 100 zusätzliche Bodenprofile würden wahrscheinlich die Modellgüte erheblich verbessern können.

4.5.3.2 Geologische Substratkarte

Bei den verhältnismässig jungen Böden im alpinen Raum spielen die geologischen Verhältnisse und insbesondere die mineralogische Zusammensetzung des Ausgangsgesteins bei der Bodenentwicklung eine sehr dominante Rolle. Die geologische Substratkarte stellt somit eine sehr entscheidende Grundlage bei der Modellierung von Bodeneigenschaften dar.

Obwohl für die Aufbereitung der geologischen Substratkarte aus der geologischen Karte 1:50'000 (Dössegger, 1987) relativ viel Zeit verwendet wurde, stellt sie immer noch einen relativ grossen Unsicherheitsfaktor dar. Die Kartierung der geologischen Karte erfolgte nach geologischen Kriterien und nicht nach mineralogischen Komponenten der Gesteine, so dass bei einigen geologischen Einheiten sowohl silikatische als auch karbonatische Gesteine enthalten sind. Über den Karbonatanteil der Gesteine sind nur relativ ungenaue Angaben aus der geologischen Karte zu entnehmen, was eine eindeutige Klassierung nach den Substratklassen teilweise verunmöglichte.

Eine grundlegende Verbesserung der Modellresultate könnte sicherlich mit einer qualitativen Verfeinerung der geologischen Substratkarte erreicht werden. Dazu müssten zusätzlich detaillierte Angaben über den prozentualen Karbonatanteil der Gesteine zur Verfügung stehen. Die Kartierung dieser Informationen wäre jedoch nur mit aufwändigen Feldarbeiten realisierbar.

Zusätzlich wertvolle geologische Inputparameter für eine Verbesserung wären der aktuelle Verwitterungsgrad sowie die generelle Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine. Gerade für die Modellierung der Bodenmächtigkeit wären diese Informationen äusserst hilfreich.

4.5.3.3 Bodenbedeckung und Vegetation

Die verwendeten Bodenbedeckungsklassen stellen die Vegetationsverhältnisse in stark vereinfachter Form dar. Im Modell wird davon ausgegangen, dass im Wald prinzipiell die entwickeltsten Böden zu erwarten sind, während auf Wiesen und Weiden je nach Situation sowohl entwickelte als auch rohe Böden vorkommen können. In Fels- und Schuttgebieten ist nur noch mit Gesteinsböden oder vegetationslosen Fels- und Schuttflächen zu rechnen. Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Vegetationskarte von Zoller (1995) als Datengrundlage verwendet, wobei sich während der Feldarbeit zeigte, dass vor allem die räumliche Kartierungsgenauigkeit stark zu wünschen übrig lässt. Eine Alternative bot sich in der Verwendung der Vector25-Primärflächen (Swisstopo, 2004), welche eine allgemein sehr gute räumliche Genauigkeit aufweisen. Allerdings liessen die Vector25-Daten nur eine simple inhaltliche Differenzierung der Vegetation nach Wald/Gebüsch, Wiese/Weide und Fels/Schuttflächen zu.

Um den Bodenbildungsfaktor Vegetation und Organismen zuverlässig abbilden zu können, bedürfte es einer Vielzahl zusätzlicher Datensätze. Da sich die Vegetation und der Boden in ständiger Wechselbeziehung und in Abhängigkeit von den gleichen unabhängigen Faktoren entwickeln, so hat jede Pflanzengesellschaft ihre eigenen Bodeneigenschaften (Bach, 1966). Eine detaillierte Vegetationskartierung wäre somit für die Verbesserung des Modells von grosser Bedeutung, da sich gewisse Bodeneigenschaften direkt über die Art der Pflanzengesellschaft ableiten liessen.

Interessant wären zudem räumliche Informationen zum Eintrag an organischem Material pro Flächeneinheit und zum Grad der Bioturbation. Dies würde direkte Rückschlüsse über die Mächtigkeit des Oberbodens zulassen. Zur Abschätzung der Erosionsanfälligkeit eines Standortes wäre aber auch der Grad der Vegetationsbedeckung von Interesse.

Der direkte und indirekte anthropogene Einfluss auf die Böden wurde im Modell ebenfalls nicht berücksichtigt. Hierzu fehlten einerseits die entsprechenden Datensätze, welche die aktuelle und historische Nutzung und Bewirtschaftung der Landschaft aufzeigen, andererseits aber auch wissenschaftliche Studien, die Aufschluss über den Einfluss des Menschen auf die Bodenentwicklung im Untersuchungsgebiet geben.

4.5.3.4 Digitales Höhenmodell und Relief

Ein DHM stellt eine unverzichtbare Grundlage bei der Bodenmodellierung dar, da sich daraus wichtige geomorphometrische Reliefparameter (Höhe, Neigung, Hangkrümmung, Exposition) ableiten lassen. Ein Höhenmodell repräsentiert aber auch nur eine modellhafte Darstellung der tatsächlichen Geländeoberfläche. Bei der Verwendung eines DHM stellt sich somit immer die grundsätzliche Frage, ob die räumliche Auflösung und Höhengenaugigkeit ausreicht, um die gewünschten Resultate zu erzielen.

Obwohl das in dieser Arbeit verwendete Höhenmodellmosaik eine vergleichsweise gute Auflösung besitzt, repräsentiert es das Mikrorelief nur ungenügend. Bodenkundlich durchaus prozessrelevante Geländestrukturen wie beispielsweise kleine Kuppen oder scharfe Geländekanten können mit einer DHM-Auflösung von 10 Metern nicht wiedergegeben werden (vgl. Kapitel 4.5.4). Das vorliegende DHM-Mosaik besteht aus vier Höhenmodellen von unterschiedlicher Auflösung, folglich kann die Qualität des DHM nicht pauschal beurteilt werden. So wird zum Beispiel im Gebiet um Il Fourn eine sehr gute Qualität erreicht, während in bewaldeten Gebieten des Unterengadins die 25-Meter Auflösung des DHM nicht optimal ist (siehe Abbildung 10). In diesem Zusammenhang sind auch Ungenauigkeiten des DHM als Folge der mosaikartigen Struktur zu nennen, welche an den Grenzen von zwei Höhenmodellen mit unterschiedlicher Auflösung entstehen. Dabei bilden sich stellenweise kleine Geländekanten, die

in Wirklichkeit gar nicht existieren. Durch die Neuberechnung des 10-Meter DHMs wird dieser Effekt zwar etwas geglättet, ist jedoch immer noch deutlich vorhanden (Abbildung 57).

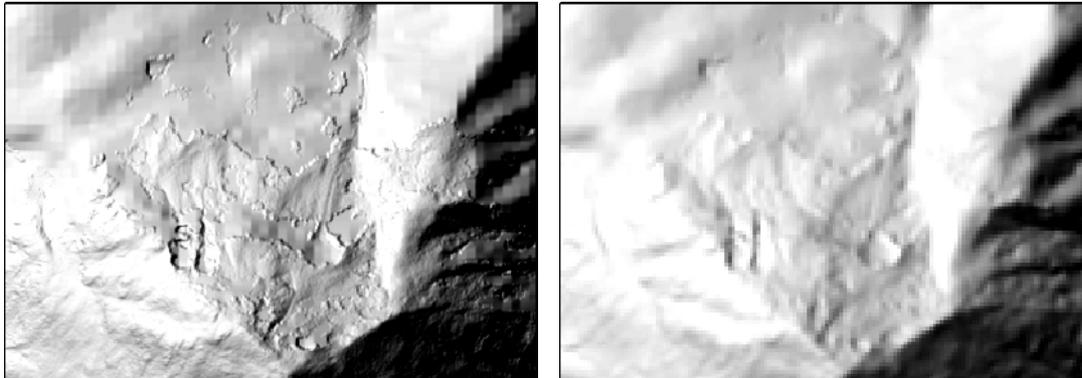


Abbildung 57: Übergänge zwischen zwei Höhenmodellen (Links: DHM-Mosaik mit 4 m und 25 m Zellengröße, rechts: neuberechnetes DHM mit 10 m Zellengröße)

Diese Ungenauigkeiten wirken sich direkt auf die Ableitung der Neigung und der Profile-Curvature aus, was zwangsläufig zu Fehlern in der Bodentypenmodellierung führt. Eine Interpretation der hypothetischen Bodentypenkarte sollte daher immer nur zusammen mit dem Schattenrelief des Höhenmodells erfolgen, bei welchem dieser Effekt deutlich sichtbar ist.

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Abbildung der für die Bodenbildung relevanten Geländeform. In dieser Arbeit wurde einfachhalber nur die Profile Curvature, also die Krümmung des Hanges in Fallrichtung, für die Geländeform verwendet. Es existieren zwar einige viel versprechende Ansätze zur Modellierung von Geländeformen, so zum Beispiel von Behrens et al. (2005). Die Anwendung dieser ist aber sehr zeitaufwändig und schwierig. In der Modellierung der Geländeformen besteht somit ebenfalls ein grosses Verbesserungspotential des Bodentypenmodells.

4.5.4 Massstab

Ein Problem bei Bodenkartierungen stellt die potentiell hohe Variabilität von Böden auf kleinstem Raume dar. Bodenbildende Prozesse laufen oftmals im mikroskaligen Bereich von wenigen Metern ab. Verhältnismässig grossmassstäbliche Bodenkarten können somit die tatsächlichen Verhältnisse ebenfalls nur generalisiert darstellen. Die Kartierung von Bodenkarten mit einer Massstabszahl $< 10'000$ ist zudem mit grossem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden und daher für grössere Gebiete oftmals nicht realisierbar.

Die räumliche Auflösung des Modells beträgt 10 Meter, was für die Modellierung von Bodeneigenschaften nicht optimal ist. Die Berechnung der Neigung an einer Rasterzelle aus dem DHM erfolgt über die jeweils 8 Nachbarzellen (vgl. Kapitel 3.2.3), folglich wird sie über eine räumliche Distanz von 3 Rasterzellen ermittelt. Die Neigung einer Zelle kann somit nicht innerhalb von 10 Metern berechnet werden, sondern stellt die gemittelte Neigung über ungefähr 30 Meter dar. Dies führt dazu, dass beispielsweise kleine topographische Unebenheiten, welche durchaus eine grosse Relevanz auf die Bodenbildung ausüben, mit einem DHM von 10 Metern nicht abgebildet werden können. Dem Mikrorelief kann somit nicht genügend Rechnung getragen werden. Bei der Auswahl der Profilstandorte im Feld wurde aus diesem Grund darauf geachtet, dass die Profile an einer für die nähere Umgebung repräsentativen Stelle gegraben wurden, um so den spezifischen Einfluss des Mikroreliefs zu vermindern.

Eine weitere massstäbliche Problematik betrifft die Überprüfung der Modellkarte anhand der Bodenprofile. Während eine einzelne Rasterzelle eine Grösse von 100 m² repräsentiert, beträgt die Ausdehnung eines Bodenprofils einige Quadratmeter und ist somit um zwei Grössenordnungen kleiner. Trotz der sorgfältigen Auswahl des Standortes besteht eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Repräsentativität des Bodenprofils für diese Rasterzelle.

Der Zielmassstab der hypothetischen Bodentypenkarte beträgt 1:40'000 und wurde auf der Basis der unterschiedlichen Massstäbe der Ausgangsdatensätze definiert. Die geologische Karte wurde im Massstab 1:50'000 (Dössegger, 1987) angefertigt, während die Vector25-Primärflächen (Swisstopo, 2004) einem Massstab von 1:25'000 entsprechen. Der gewählte 1:40'000 Massstab kann somit als Kompromiss zwischen den verschiedenen Datengrundlagen angesehen werden. Hinzu kommt, dass eine Rasterzellengrösse von 10 Metern in einem Massstab von 1:40'000 noch druckbar abgebildet werden kann.

4.5.5 Übertragbarkeit auf andere Gebiete.

Die technische Implementierung im GIS wurde so gestaltet, dass eine Anwendung auf ein anderes Gebiet prinzipiell möglich wäre, wobei jedoch einige Voraussetzungen gegeben sein müssten.

Eine Anwendung in einem topographisch und klimatisch völlig anderen Gebiet, wie beispielsweise dem Mittelland, wäre nicht sinnvoll, da dort oft andere Bodenbildungsprozesse vorherrschen und folglich auch andere Bodentypen (z.B. Parabraunerden) vorkommen, welche vom Modell nicht berücksichtigt werden. Eine Anpassung käme somit nur in einem ebenfalls alpinen Gebiet in Frage.

Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze. Als unverzichtbare Datengrundlagen wären ein DHM mit vergleichbarer räumlicher Auflösung, eine geologische Kartierung sowie die Primärflächen von Vector25. Ganz allgemein darf die Anpassung des Modells an die lokalen Gegebenheiten einer Region nicht unterschätzt werden. So müssten beispielsweise die Fuzzy-Klassen neu definiert und angepasst werden. Für die Regelbildung und die anschliessende Validierung müssten zusätzlich möglichst viele Bodenprofile oder allenfalls eine detaillierte Bodenkartierung vorliegen. Gerade die Anpassung des Modells auf ein Gebiet, von welchem eine detaillierte Bodenkartierung existiert, wäre für die Beurteilung der Modellgüte sehr interessant und hilfreich.

5 Schlussfolgerungen

Die Feldarbeiten bestätigten, dass im Untersuchungsgebiet vorwiegend junge Böden anzutreffen sind. Das Bodenalter geht maximal bis zum Ende der letzten Eiszeit zurück (Zoller, 1995). In grossen Teilen des Gebietes sind die Böden jedoch bedeutend jünger einzuschätzen, da verschiedene geomorphologische Prozesse die Bodenbildung immer wieder stören. An vielen Stellen konnte zudem die schon oft beschriebene kleinräumige Vergesellschaftung von Bodentypen beobachtet werden. Aufgrund des beschränkten Bodenalters hat die Mineralogie der Ausgangsgesteine einen grossen Einfluss auf die Bodenentwicklung. Diese Tatsache beeinflusst in starkem Masse das räumliche Verteilungsmuster der Bodentypen.

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass von den gesamthaft 420 km² potentiellen Bodenentwicklungsflächen, also Flächen auf denen eine Bodenbildung möglich ist, 133 km² (31.8 %) aus Gebieten bestehen, auf denen keine Bodenbildung existiert. Die Verbreitung beschränkt sich auf sehr hoch gelegene, oftmals steile Gebiete mit entsprechend vegetationsfeindlichen Klimaverhältnissen.

An meist etwas geschützten Standorten mit einer spärlich vorhandenen Pioniervegetation bilden sich Gesteinsböden. Sie bedecken ungefähr 11 % der Gesamtfläche und stellen das Übergangsstadium zu den Humus-Gesteinsböden dar. Böden mit einer durchgehenden organischen Auflage und somit mehr oder weniger geschlossener Vegetationsdecke wurden als Humus-Gesteinsböden modelliert und bedecken im Gesamten eine Fläche von 63 km² (15 %). Die Rendzina ist im Untersuchungsgebiet der häufigste Bodentyp und bedeckt eine Fläche von 70 km² (16,74 %). Er stellt das Klimaxstadium der karbonatischen Böden dar und ist entweder im Wald oder an geomorphologisch stabilen Standorten auf Wiesen der subalpinen und alpinen Stufe anzutreffen. Podsole und saure Braunerden finden sich vor allem unter Wald und subalpinen Wiesen des Unterengadins und machen 15.8 % der Gesamtfläche aus. Innerhalb der Nationalparkgrenzen finden sich einzig am Nord- und Westhang des Munt la Schera nennenswerte Vorkommen von silikatischen Böden. Die Verbreitung von Nassböden ist aufgrund des verhältnismässig trockenen Klimas im ganzen Untersuchungsgebiet gering, der Flächenanteil beträgt lediglich 0,46 %. Eine Unterscheidung der Nassböden nach Gleyen, Pseudogleyen und Mooren war nicht möglich, da keine detaillierten hydrologischen Karten zu Verfügung standen.

Aus der hypothetischen Bodentypenkarte wurden zusätzlich der gemittelte Oberboden-pH und die gemittelte Bodenmächtigkeit modelliert. Auf die Herleitung anderer Bodeneigenschaften wurde bewusst verzichtet, da die vorhandenen Datengrundlagen keine sinnvolle Modellbildung erlaubten. Beim Oberboden-pH zeigt sich, dass der pH mit zunehmender Höhe generell zunimmt. In tiefen Lagen mit karbonatischem Substrat und einer geschlossenen Vegetationsdecke (Rendzina-Standorte) liegen die pH Werte (CaCl₂) im schwach sauren bis neutralen Bereich. Auf entwickelten silikatischen Böden (Podsolen und sauren Braunerden) liegen sie mit 3,5 bis 4 im sauren Bereich.

Die Bodenmächtigkeit spiegelt ebenfalls die ausgeprägte Höhenzonalität der Bodentypen wieder. Die gemittelte Bodenmächtigkeit nimmt mit der Höhe stark ab. Auf silikatischen und gemischten Bodentypen werden allgemein grössere Bodenmächtigkeiten erreicht, da diese Böden oft Unterbodenhorizonte aufweisen, während auf karbonatischen Standorten deutlich geringere Mächtigkeit ermittelt wurden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell stellt in seiner Gesamtheit sicherlich einen interessanten Ansatz zur Modellierung von Bodentypen dar, auch wenn die Resultate aus verschiedenen Gründen nur eine beschränkte Zuverlässigkeit aufweisen. Eine Beurteilung der ange-

wandten Methodik muss aber immer unter Berücksichtigung der Tatsache erfolgen, dass selbst im Feld kartierte Böden immer eine starke Abstraktion der tatsächlichen Verhältnisse darstellen.

Die Validierung der hypothetischen Bodenkarte wurde auf der Basis von 89 Bodenprofilen vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass 58 % der Bodenprofilstandorte korrekt modelliert werden konnten. Unter Vernachlässigung der teilweise stark vereinfachten geologischen Substratkarte wurde sogar eine Übereinstimmung von 67 % erreicht. Eine zusätzliche Überprüfungsmöglichkeit stellte der Vergleich mit der Bodeneignungskarte 1:200'000 (Frei et al., 1980) dar. Innerhalb der einzelnen physiographischen Kartiereinheiten der Bodeneignungskarte wurden Übereinstimmungen von 70 - 90 % ermittelt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Bodeneignungskarte ihrerseits die bodenkundlichen Verhältnisse nur in stark generalisierter Form darzustellen vermag. Für eine stichfeste Beurteilung der Modellgüte müsste eine detaillierte im Feld erstellte Bodenkarte vorliegen und zusätzlich die Möglichkeit bestehen die hypothetische Bodenkarte ausführlich im Feld zu überprüfen.

Ein grundsätzliches Problem stellte die Tatsache dar, dass trotz Feldarbeiten keine klar definierten Gesetzmässigkeiten über den Einfluss der verwendeten Standortfaktoren auf die Bodenentwicklung gefunden werden konnten. Dazu wären umfangreiche zusätzliche Studien nötig, die den Einfluss der wichtigsten Standortfaktoren im Detail untersuchen würden.

Die Verwendung eines Fuzzy-basierten Modellansatzes ermöglichte es jedoch, das vorhandene bodenkundliche Erfahrungswissen und entsprechende hypothetische Annahmen auf logische und systematische Art in einem Regelwerk zu implementieren. Das angewandte Berechnungsverfahren erlaubte zudem einen gewissen Spielraum bei der Definition der Modellregeln, da nicht nur eine Regel, sondern durch die Schwerpunktgewichtung gleich mehrere Regeln die Bodentypzugehörigkeit ermittelte. Ein weiterer Vorteil der Fuzzy-Logik besteht in der realitätsnäheren Abbildung von kontinuierlichen Naturphänomenen. Die graduellen Übergänge zwischen einzelnen Bodentypen konnten mittels Zugehörigkeitskarten besser dargestellt werden. Dabei konnte bis zu einem gewissen Grad dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Kombination von Standortfaktoren verschiedene Bodentypen mit unterschiedlicher Intensität begünstigen kann.

Die Qualität von digitalen Datengrundlagen beeinflusste in grossem Masse die Modellresultate. Die Entwicklung des Modells richtete sich stark nach der Verfügbarkeit und inhaltlichen Qualität der Datensätze. Die nur beschränkte Anzahl Bodenprofile bot nur eine ungenügende Grundlage und Vergleichsbasis für die Modellierung. Die Ansprache vieler zusätzlicher Bodenprofile im Untersuchungsgebiet würden das Wissen über das Wirken der Standortfaktoren auf die Bodenentwicklung erheblich verbessern können.

Zwar ist die Verfügbarkeit von GIS-Datensätzen im Vergleich mit anderen alpinen Regionen als sehr gut zu beurteilen, aber für die Modellierung von Bodeneigenschaften weisen die vorhandenen digitalen Karten immer noch erhebliche Mängel auf. Einerseits bestand das Problem, dass die geologische Karte sowie die Bodenbedeckung schon als klassierte Datensätze vorlagen, was eine Fuzzy-logische Verarbeitung dieser Inputparameter verunmöglichte, andererseits war die inhaltliche Differenzierung von geologischen Einheiten und Vegetationsklassen nicht optimal. Dabei fehlte es vor allem an spezifischen Informationen zum mineralogischen Mischverhältnis von quartären Lockergesteinsablagerungen und Grundmoränen. Grosses Verbesserungspotential würde dabei in der Kartierung einer detaillierten Vegetationskarte und einer mineralogischen Grundlegkarte bestehen.

Bodenbildende Prozesse spielen sich oftmals im mikroskaligen Bereich von wenigen Metern ab. Das verwendete DHM-Mosaik mit einer gemittelten Auflösung von 10 Metern konnte die kleinräumige Variabilität des Reliefs nur beschränkt nachbilden. Gerade die verwendete *Profile Curvature*, also die Krümmung des Hanges in Fallrichtung, stellte einen sehr einfachen

Parameter zur Repräsentierung der Geländeform dar. In der Herleitung von bodenrelevanten Geländeformen besteht somit ebenfalls ein grosses Verbesserungspotential.

Abschliessend kann gesagt werden, dass das in dieser Arbeit entwickelte Modell zwar einen recht guten Ansatz zur Herleitung von Bodentypen und Bodeneigenschaften darstellt, aber in diesem Entwicklungsstadium nicht die Qualität und Zuverlässigkeit einer im Feld erstellten Bodenkarte erreicht. Die Modellierung von Bodentypen und Bodeneigenschaften stellt aufgrund der Komplexität der Bodenbildung im Alpenraum allgemein hohe Anforderungen an die Struktur des Modells und die Qualität der Inputdatensätze. Dieser Tatsache konnte im Rahmen dieser Diplomarbeit nur bedingt Rechnung getragen werden.

6 Literaturverzeichnis

- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage. Hannover.
- Arbeitskreis Bodensystematik (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. Arbeitskreis für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.
- Arbeitskreis Standortkartierung (1996): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 5. Auflage, IHW-Verlag München.
- Bach R. (1966): Durch den schweizerischen Nationalpark: Ein wissenschaftlicher Führer. Verlag Schweizerischer Bund für Naturschutz, Basel.
- Bahrenberg G., Giese E., Nipper J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Teubner Studienbücher, Stuttgart.
- Bandemer H. (1993): Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen. Akademie Verlag Berlin.
- Behrens, T., Förster, H., Scholten, T., Steinrücken, U., Spies, E.-D., Goldschmitt, M. (2005): Digital soil mapping using artificial neural networks, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, J. Plant Nutr. Soil Sci*, 2005, 168, 21-33.
- Benner D. C. (1970): Untersuchungen an Schutthalden im Schweizerischen Nationalpark und dessen Umgebung. Diplomarbeit Universität Zürich.
- BGS, FAP (1992): Klassifikation der Böden der Schweiz. BGS und FAP, Zürich.
- Blaser P., Zimmermann S., Luster J., Walthert L., Lüscher P. (2005): Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. WSL Birmensdorf. Hep Verlag Bern.
- Boesch H.H. (1937): Geologie der zentralen Unterengadiner Dolomiten. Dissertation Universität Zürich.
- Böhme G. (1993): Fuzzy-Logik, Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen. Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- Bothe H.H. (1993): Fuzzy-Logic: Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Burrough P.A., (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press, New York.
- Burrough P.A. (1989): Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science* 40, 477-492.
- Burrough P. A., McDonnell R. A. (2000): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford.

- Braun-Blanquet J., Pallmann H., Bach R. (1954): Pflanzensoziologische und bodenkundliche Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark und seinen Nachbargebieten. Liestal.
- Braun-Blanquet J., Pallmann H., Jenny H. (1926): Vegetations-Entwicklung und Bodenbildung in der alpinen Stufe der Zentralalpen: Mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse im Schweizerischen Nationalpark. Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 33, 297-350. Zürich.
- Brugger H. (1974): Umwandlung der Silikate bei der Bodenbildung aus Dolomit im Schweizerischen Nationalpark. Dissertation ETH Zürich.
- Brunner J., Jäggi F., Nievergelt J., Peyer K. (1997): Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, FAL Zürich-Reckenholz.
- Budavàry R. (1999): Böden im Unterengadin und Münstertal: Beschreibung und Charakterisierung von 46 Bodenprofilen. Untersuchung an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, Abteilung Bodenökologie, unveröffentlicht.
- Budavàry R. (2001): Analyse bodenkundlicher Daten aus Felderhebungen im Schweizerischen Nationalpark und den angrenzenden Gebieten. Diplomarbeit ETH Zürich.
- Deckers J. A. (1998): World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rom.
- De Gruijter J.J., Mc Bratney A. B., Mc Sweeney K. (1997): Fuzzy Sets in Soil Science. Geoderma Vol. 77.
- Dikau R. (1990): Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 80, 45-55.
- Dolder W. (1977): Der Schweizerische Nationalpark. Silva-Verlag, Zürich.
- Dössegger R. (1987): Geologische Karte des Schweizerischen Nationalparks 1:50'000. Geologische Spezialkarte Nr.122.
- Dössegger R. (1974): Verrucano und „Buntsandstein“ in den Unterengadiner Dolomiten. Dissertation Nr. 5346, ETH Zürich.
- Egli M., Achermann M., Häflinger S. (2004): Modellierung von Bodenkarten: Ansätze zur Verbesserung der bestehenden Grundlagen. BGS Bulletin.
- Fitze P., Kägi B., Egli M. (2002): Laboranleitung zur Untersuchung von Boden und Wasser. Geographisches Institut Universität Zürich.
- Fitze, P. (1998): Bodengeographie, Skript zur Vorlesung. Geographisches Institut Universität Zürich.
- Fitze P., Alther E., Bonnard L.-F., Brunner J., Frei E., Gratier M., Juchler St., Lüscher P., Müller M., Peyer K., Presler J., Sticher H. (1996): Schlüssel zur Klassifikation der Bodentypen der Schweiz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz.

- Frei E., Vökt U., Flückiger R., Brunner H., Schai F. (1980): Bodeneignungskarte der Schweiz, Massstab 1:200'000. Grundlagen für die Raumplanung, Bundesämter für Raumplanung, Landwirtschaft und Forstwesen, EDMZ Bern.
- Fries M. (1985): Bodenkundliche Studien unter einem Caricetum Firmae auf dem Munt la Schera im Schweizerischen Nationalpark. Dissertation Universität Zürich.
- Gensler G. A. (1978): Das Klima von Graubünden. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr.77, Zürich.
- Graf K. (1997): Wie Dolomite und Silikatgesteine den Nationalpark landschaftlich prägen. Cratschla 2/1997, 15-17.
- Grauel A. (1995): Fuzzy-Logik: Einführung in die Grundlagen mit Anwendungen. B-I Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- Hintermaier-Erhard G. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Jenny H. (1941): Factors of Soil Formation, McGraw-Hill Book Company.
- Kahlert J. (1993): Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control: Eine anwendungsorientierte Einführung mit Begleitsoftware. Vieweg-Verlag, Braunschweig.
- Keller F. (1988): Permafrostverbreitung im Nationalpark. Diplomarbeit Universität Zürich.
- Keller T., Desales A. (2001): NABO: Böden der Schweiz: Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990-1996). Buwal, Bern.
- Klingl T. (1996): GIS-gestützte Generierung synthetischer Bodenkarten und landschaftsökologische Bewertung der Risiken von Bodenwasser- und Bodenverlusten. Geographica Bernensia, Nr. 50, Bern.
- Kofalk S. (1998): Einfluss von Bodenvariabilität und Relief auf Wasserhaushalt und Stickstoffgehalte eines Grundmoränenstandorts. Institut für Oekologie & Biologie, Technische Universität Berlin.
- Krüsi B. O., Schütz M., Gräminger H., Achermann G. (1996): Was bedeuten Huftiere für den Lebensraum Nationalpark? Eine Studie zum Nahrungsangebot und Waldverjüngung. Cratschla, 4/1996, 51-64.
- Labhart T. (1992): Geologie der Schweiz. Ott Verlag, Thun.
- Landolt E. (1992): Unsere Alpenflora. Verlag Schweizer Alpen-Club, Brugg.
- Leuenberger R. (1950): Beitrag zur Kenntnis der Humuskarbonatböden und Rendzinen im Schweizer Jura. Zürich.
- Lüscher P. (1991): Humusbildung und Humusumwandlung in Waldbeständen. Dissertation Nr. 9572 ETH Zürich.
- Lüscher P. (2004): Vielseitige Nationalpark-Böden. Cratschla 2/2004, 6-7.

- Margreth, M. (2004): GIS-gestützte Modellierung der Bodentypen und anderen Bodeneigenschaften im Berninatal. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Mertens M. (2001): Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie auf die Modellierung von Stickstoffbilanzen im Weissenstädter Becken. Dissertation Universität Bayreuth.
- Müller M. (1983): Bodenbildung auf Silikatunterlage in der alpinen Stufe des Oberengadins. Dissertation ETH Zürich.
- Möller H. (1981): Der Humusformindex, ein einfaches Mittel zur zahlenmässigen Erfassung der Humusform terrestrischer Waldböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 144, 57- 64.
- Obrecht J.M., Schlupe M. (1994): Untersuchungen über die Herkunft der Schwermetalle in den Böden am Munt la Schera im Schweizerischen Nationalpark. Diplomarbeit ETH Zürich, Schlieren.
- Ott E., Frehner M., Frei H.U., Lüscher P. (1997): Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Hauptverlag Bern.
- Parolini J. D. (1995): Zur Geschichte der Waldnutzung im Gebiet des heutigen Schweizerischen Nationalparks. Dissertation ETH Zürich.
- Petry F.E. (2005): Fuzzy-Modeling with Spatial Information for Geographic Problems. Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- Porret A. (2001): Räumliche und zeitliche Vegetationsmodellierung auf subalpinen Weiden im Schweizerischen Nationalpark. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Reithebuch J. (1990): Geomorphologische Kartierung im westlichen Teil des Schweizerischen Nationalparks. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Reusser S. (1990): Geomorphologische Kartierung im Massstab 1:25'000 im Schweizerischen Nationalpark (GMK II Fuorn). Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Richard F., Lüscher P., Strobel T. (1978): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Band 1, 16-34. ETH Zürich, WSL Birmensdorf.
- Ruef A., Peyer K. (1996): Handbuch Waldbodenkartierung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, 15. überarbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg-Berlin.
- Schloeth R. (1976): Der Schweizerische Nationalpark. Ringier, Zofingen.
- Schmidt D. (1995): Koppelung eines Fuzzy-Klassifikationsmodells mit einem Geographischen Informationssystem zur Modellierung eines unscharfen Entscheidungsprozesses. Salzburger geographische Materialien Nr. 22, 245- 255.

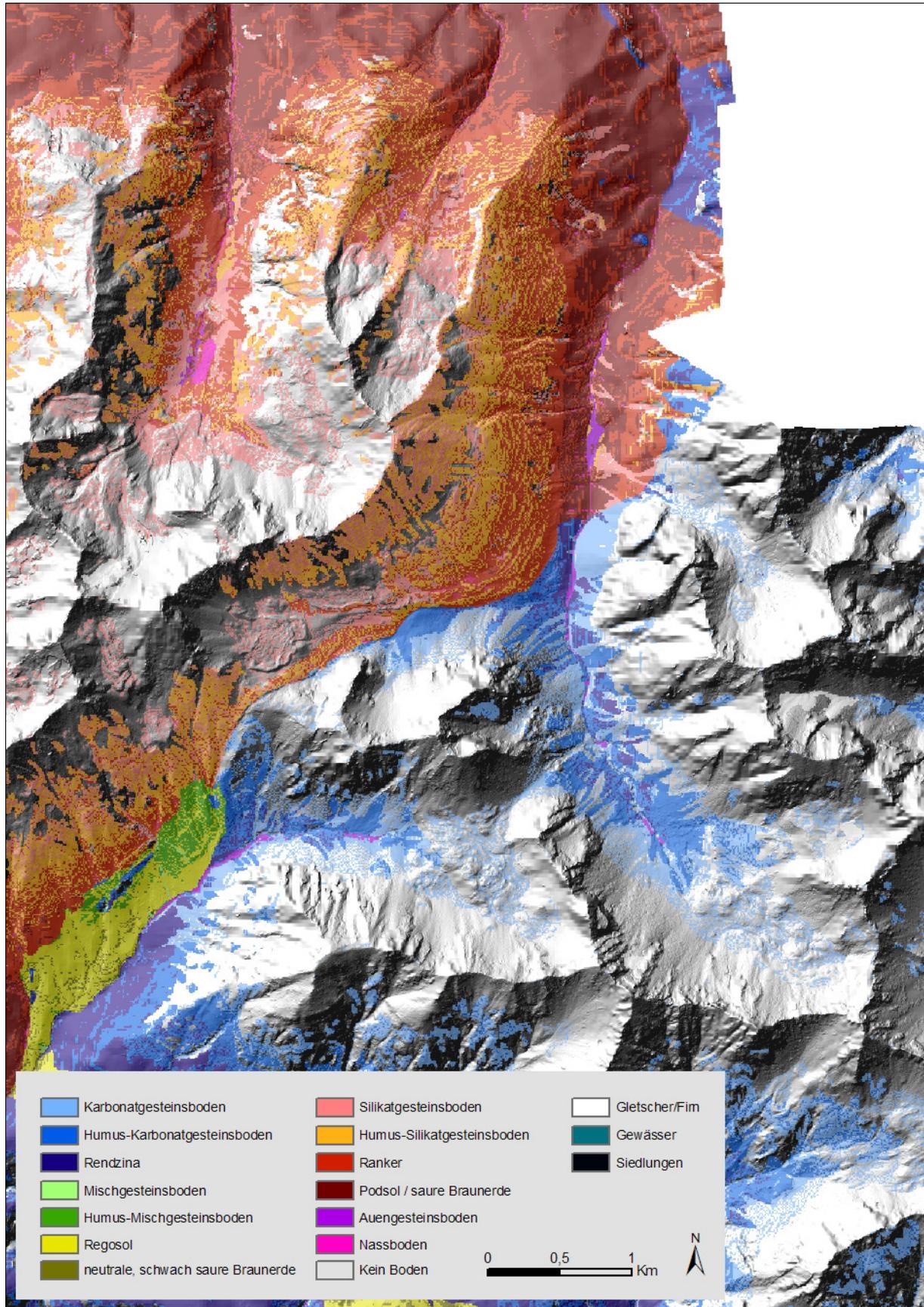
- Schmidt R. (2000): Projektbericht GMK25: Integration der Geomorphologischen Kartierung in das Rauminformationssystem des Schweizerischen Nationalparks. unveröffentlicht.
- Semmel A. (1993): Grundzüge der Bodengeographie. Teubner Verlag Stuttgart.
- Sieber P. (2000): Dendrochronologische Untersuchungen im Waldgrenzökoton des Munt la Schera im Schweizerischen Nationalpark. Diplomarbeit Universität Zürich.
- Stetter G. (1996): Geomorphologische Kartierung im Schweizerischen Nationalpark: Val Cluozza. Diplomarbeit Geographisches Institut Universität Zürich.
- Stolz R. (1998): Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Ein methodischer Ansatz zur Verbesserung von Landnutzungsklassifikationen in mesoskaligen heterogenen Räumen, dargestellt am Einzugsgebiet der Ammer. Münchner Geographische Abhandlungen, München.
- Swisstopo (2004): Vector 25 - Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Produkteinformation. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.
- Terra Grischuna (1976): Terra Grischuna, Zeitschrift für bündnerische Kultur. Wirtschaft und Verkehr, Ausgabe Nr. 3, 1976. Terra Grischuna Verlag, Chur.
- Traeger D. H. (1993): Einführung in die Fuzzy-Logik. Teubner Verlag Stuttgart.
- Tranquillini W. (1979): Physiological ecology of the alpine timberland. Tree existence at high altitudes with special reference to the European alps. Ecological studies. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Trümpy R. (1997): Erläuterungen zur geologischen Karte 1:50'0000 des Schweizerischen Nationalparks. Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften, Bern.
- Turner H., Blaser P. (1977): Mikroklima, Boden und Pflanzen an der oberen Waldgrenze. Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (heute WSL), Birmensdorf.
- Walter H., Lieth H. (1967): Klimadiagramm Weltatlas. Fischer Verlag, Jena.
- Walthert L., Zimmermann S., Blaser P., Luster J., Lüscher P. (2004): Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL Birmensdorf. Hep Verlag Bern.
- Wernli M. (2004): Klimabedingte Änderung von Böden: Analyse im Gletschervorfeld mittels bodenkundlicher Analyse und GIS. Diplomarbeit Geographisches Institut Universität Zürich.
- Witzig J. (1999): Pedogenese und Verwitterungsraten ausgewählter alpiner Böden unterschiedlichen Alters auf kristallinem Untergrund. Diplomarbeit Universität Zürich.
- WNPK (Hrsg.) (1989): Forschungskonzept Nationalpark, Grundsätze und Leitlinien zur Nationalparkforschung, Herausgegeben von der Kommission zur wissenschaftlichen Erforschung des Schweizerischen Nationalparks. Bern.
- WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) (2001): Kleines Aufnahmeprotokoll. Anleitung zur Bodenansprache im Gelände. WSL, Birmensdorf.

- Zimmermann S. (1997): Wirkung einer gepufferten Ammonium-Acetat-EDTA Extraktion auf ausgewählte Bodenbestandteile und natürliche Bodenproben. Dissertation ETH Zürich.
- Zimmermann H. J. (1993): Fuzzy Technologien, Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale. Düsseldorf.
- Zoller H. (1992): Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks und seiner Umgebung, 1:50'000, auf der topographischen Basis der Landeskarte der Schweiz (Blätter Tarasp 249, Ofenpass 259). Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften SANW zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalpark (eds.) Hallwag AG, Bern.
- Zoller H. (1995): Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks. Erläuterungen. Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften SANW zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalpark (WNPK), Zerneß.

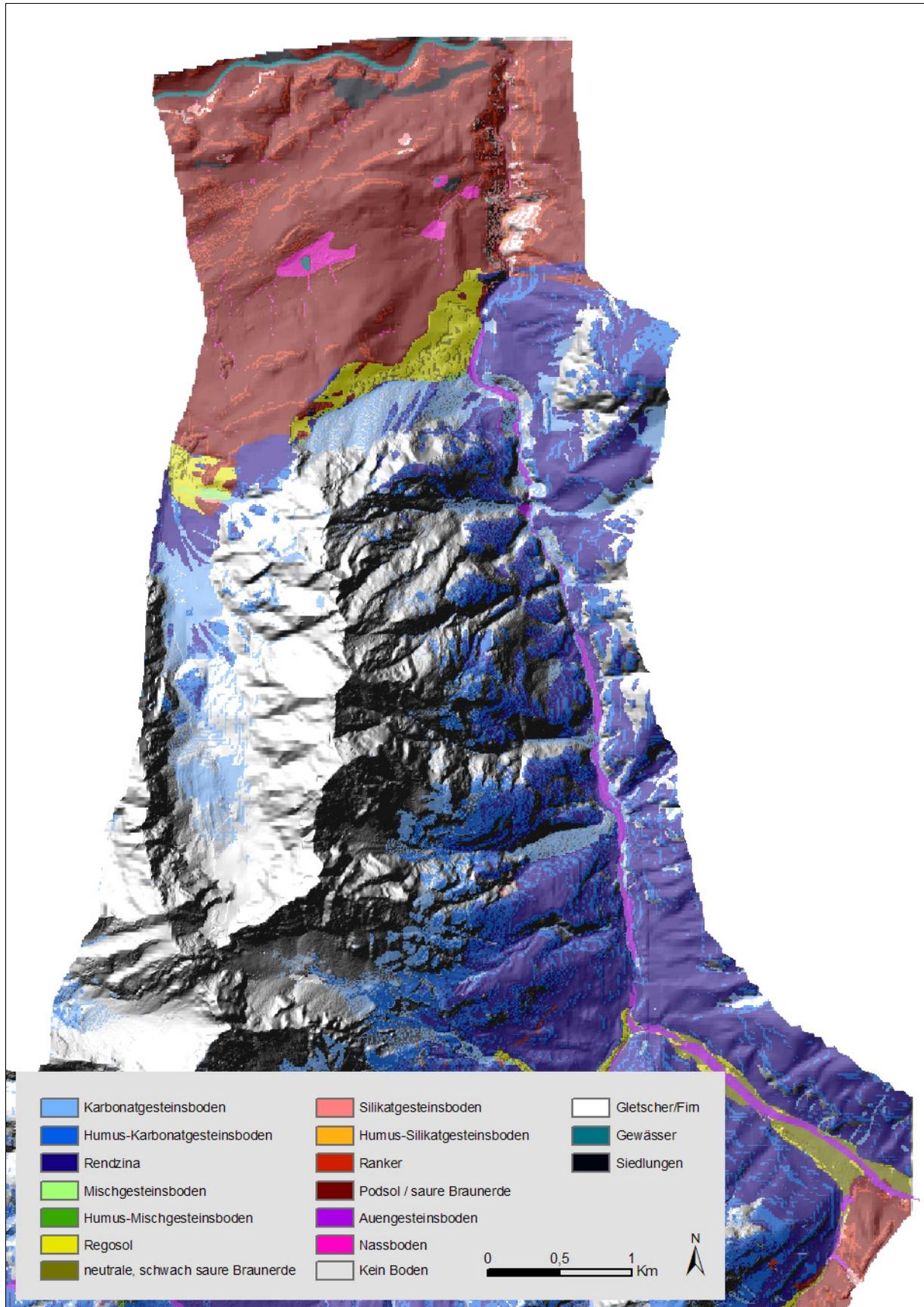
Anhang

Die hypothetische Bodentypenkarte im Masstab 1:40'000:

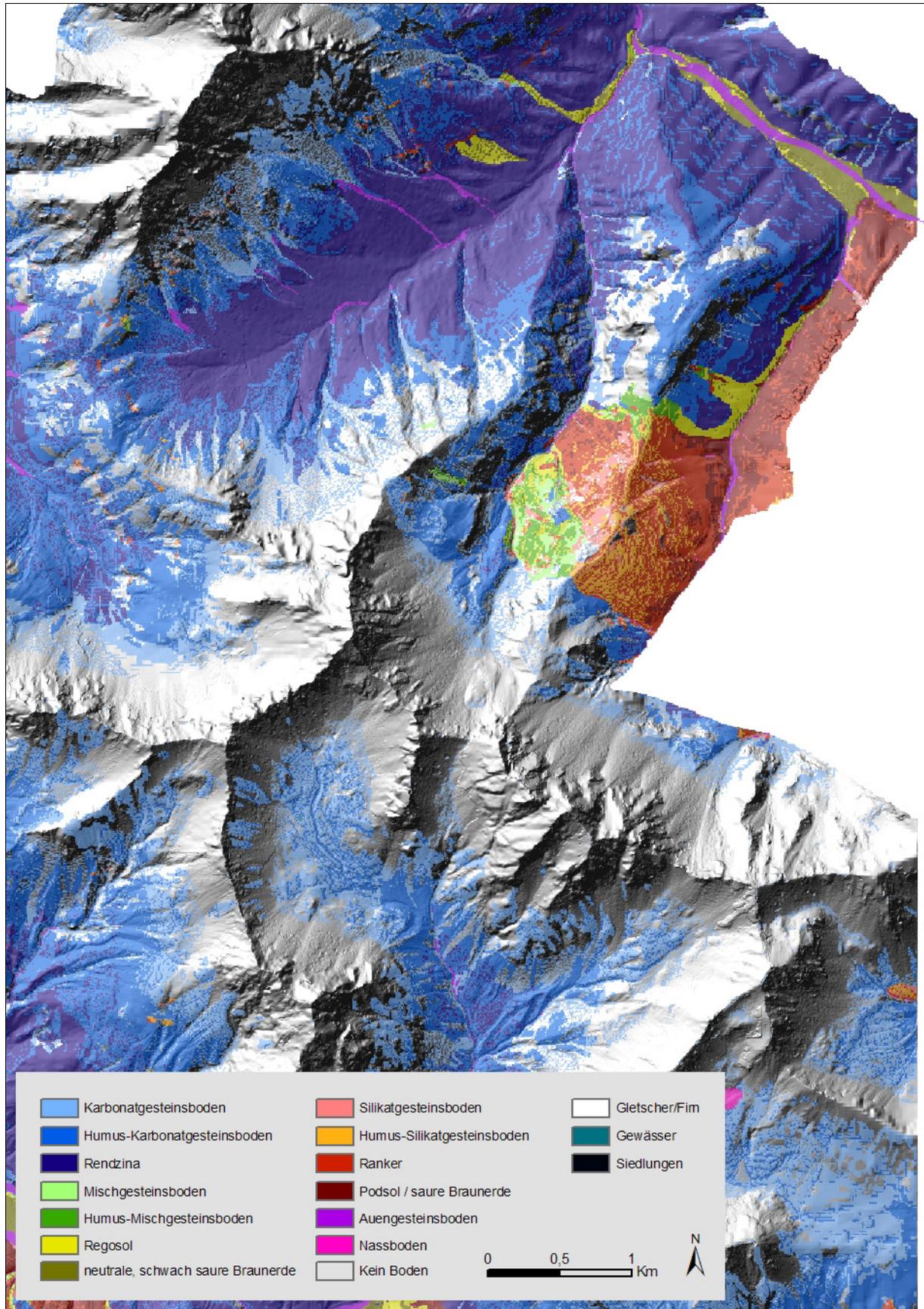
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Val Sampuoir und Piz Laschadura:



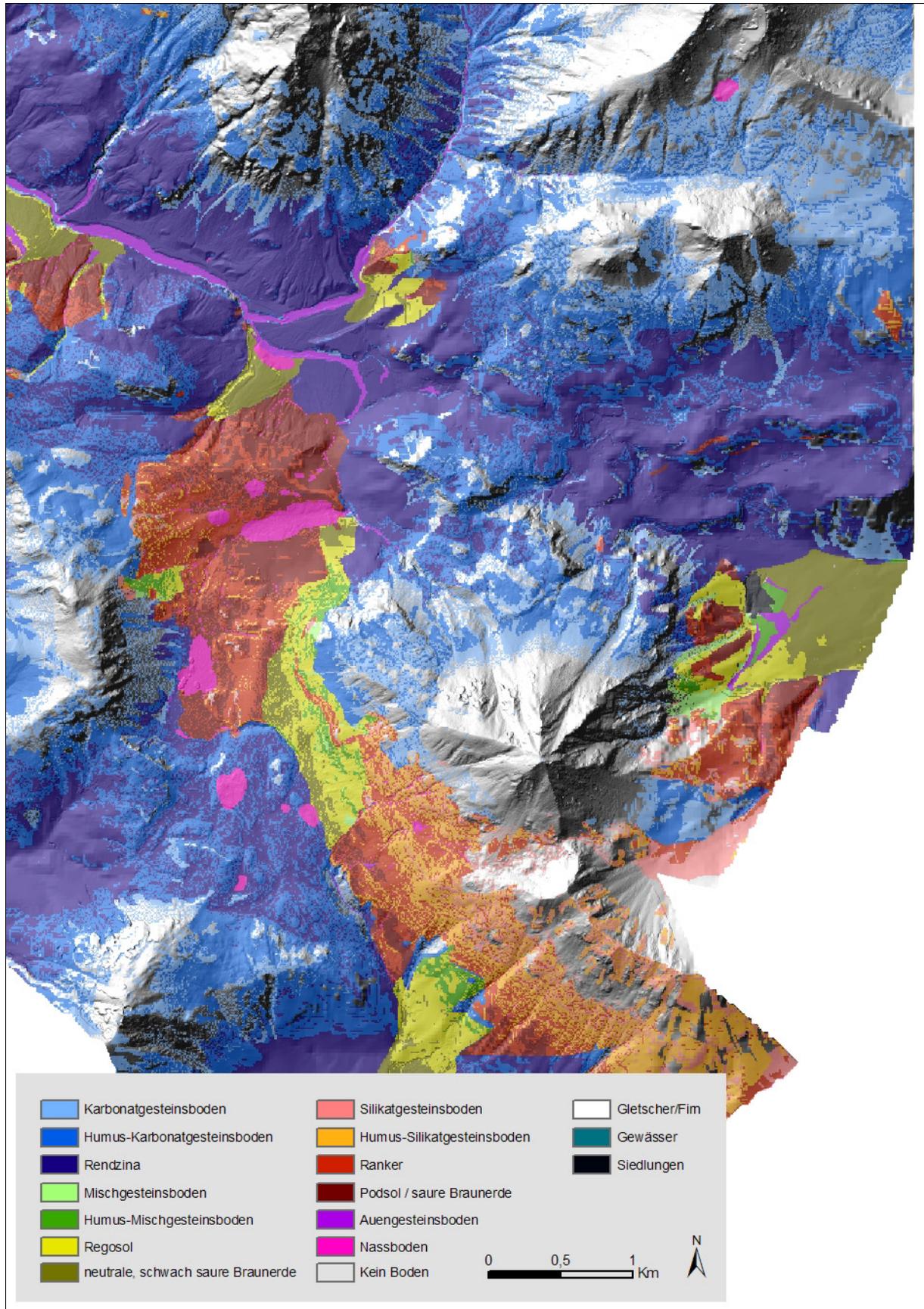
Die hypothetische Bodentypenkarte im nördlichen Teil des Val S-charl:



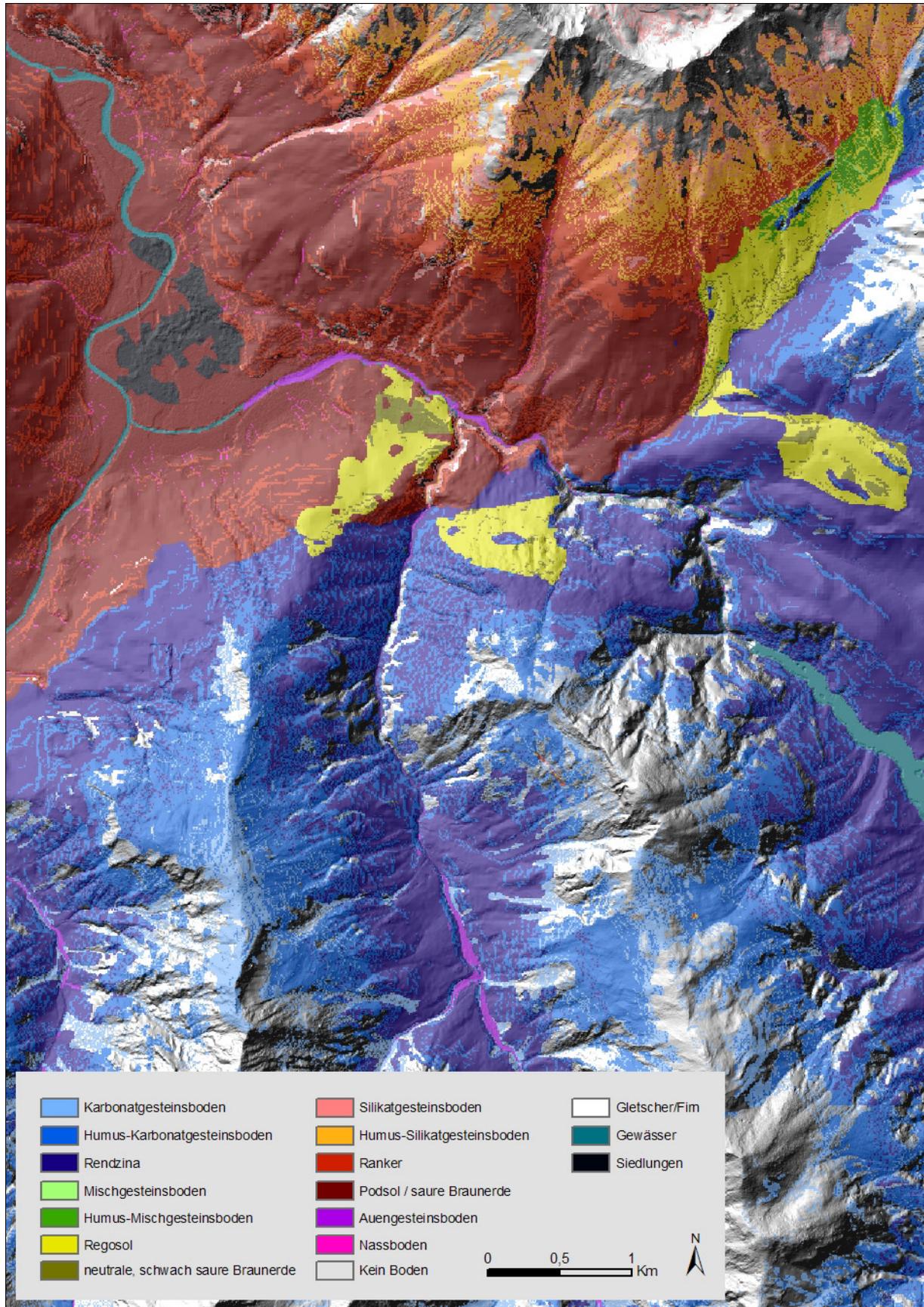
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Val Minger und Val Nügliä:



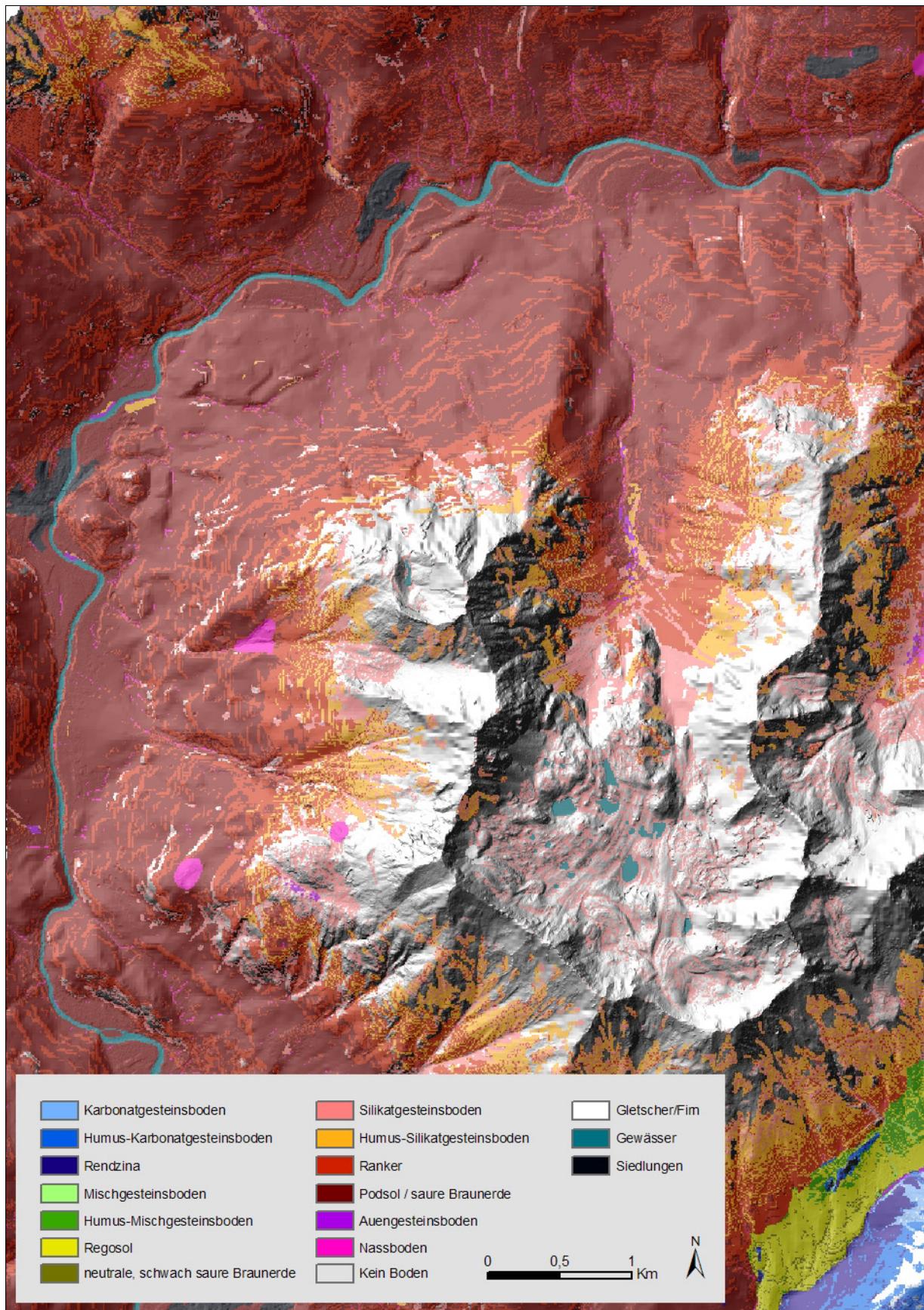
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Ofenpasses und Buffalora:



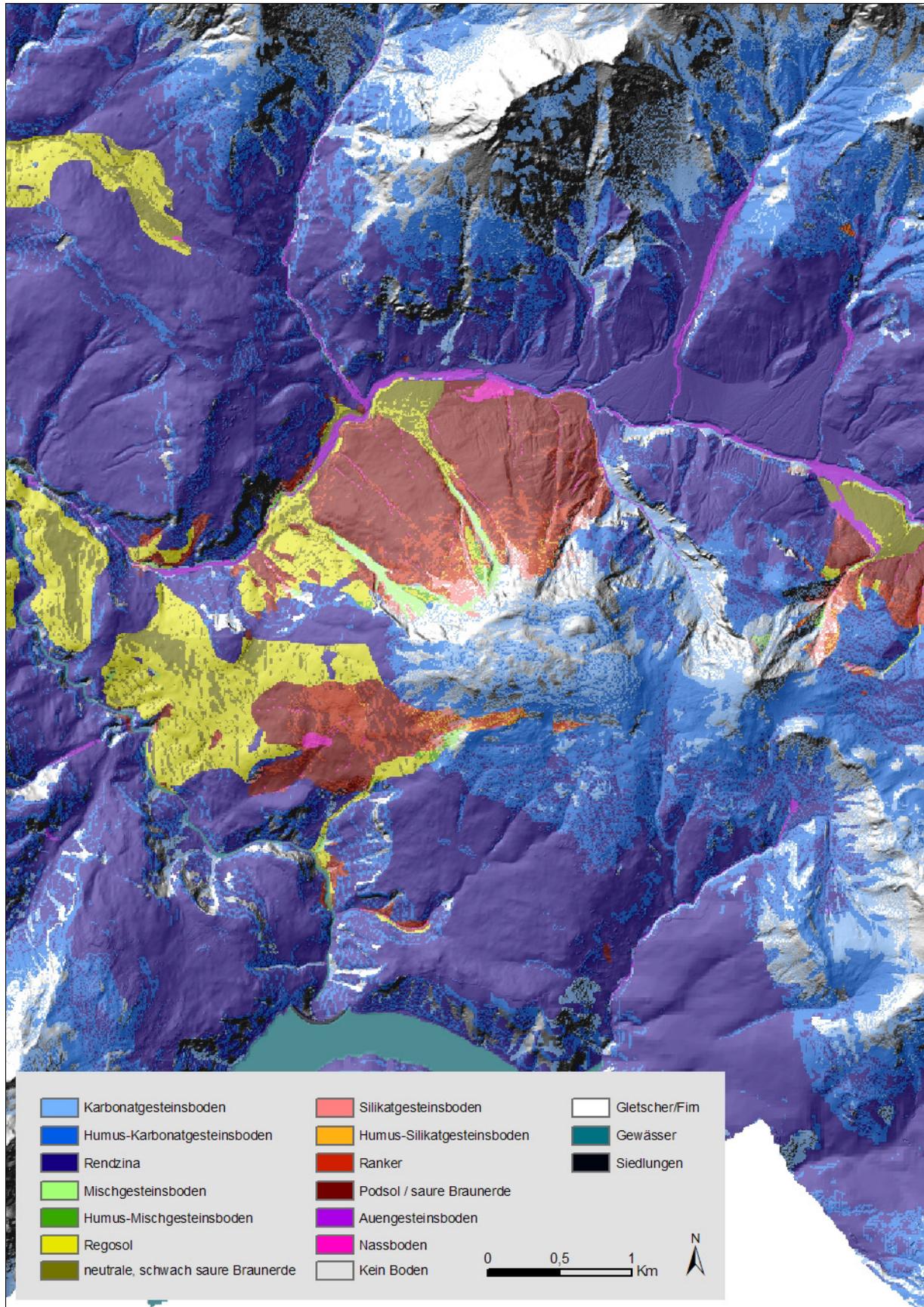
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet von Zernez und des nördlichen Teils des Val Cluozza:



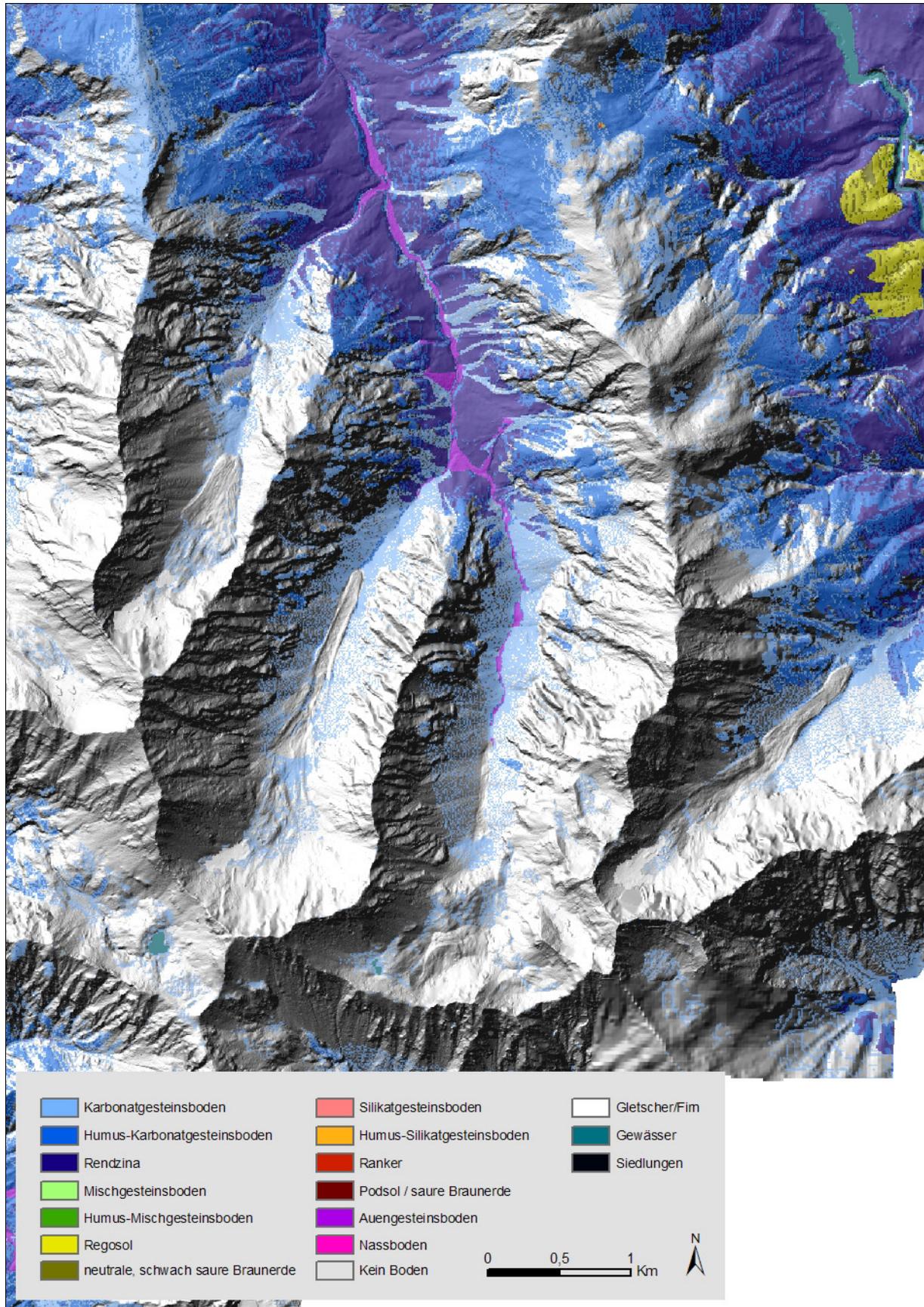
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet von Macun und des Unterengadins zwischen Zernez und Guarda:



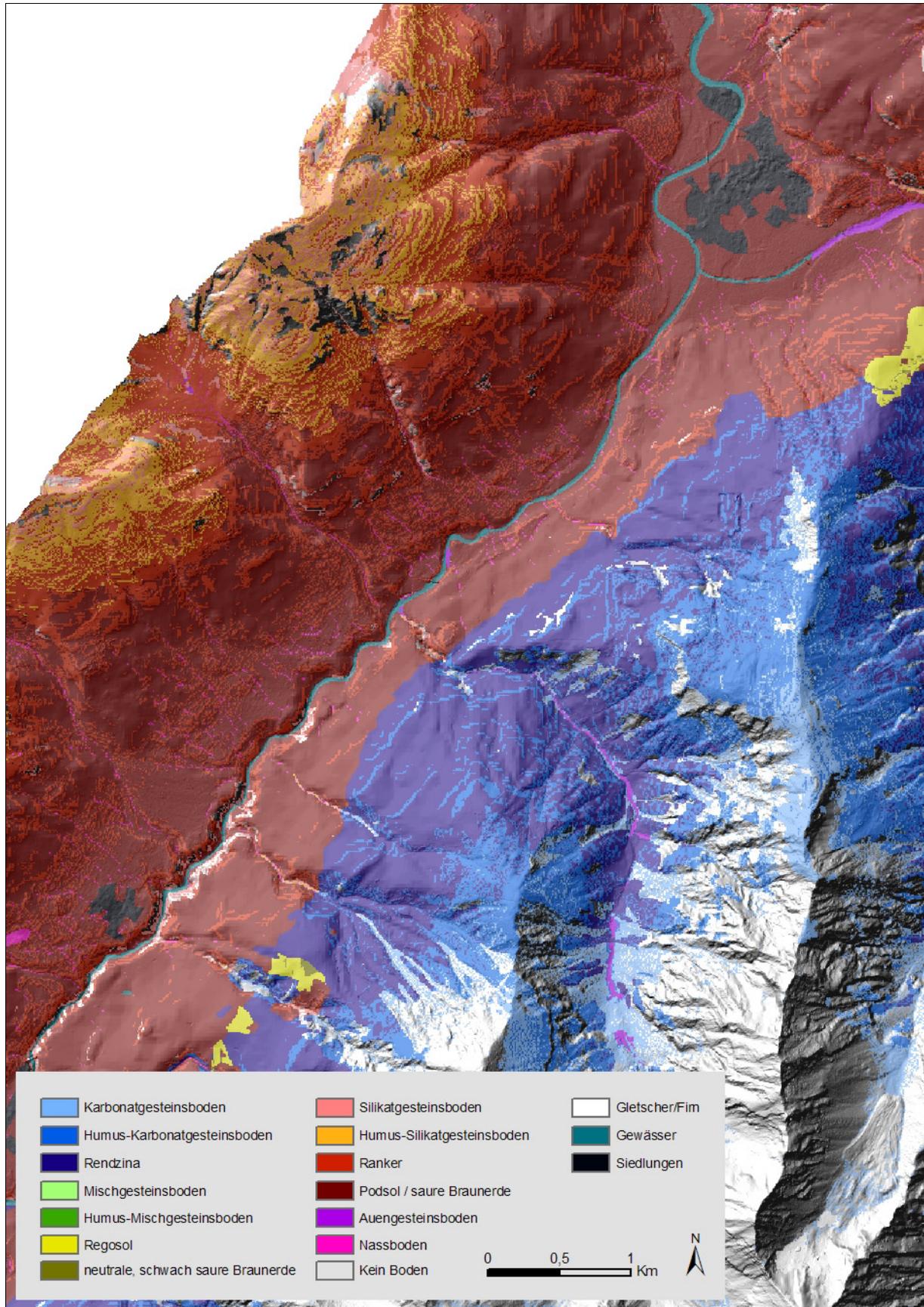
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Munt la Schera, Val dal Spöl und Il Fourn:



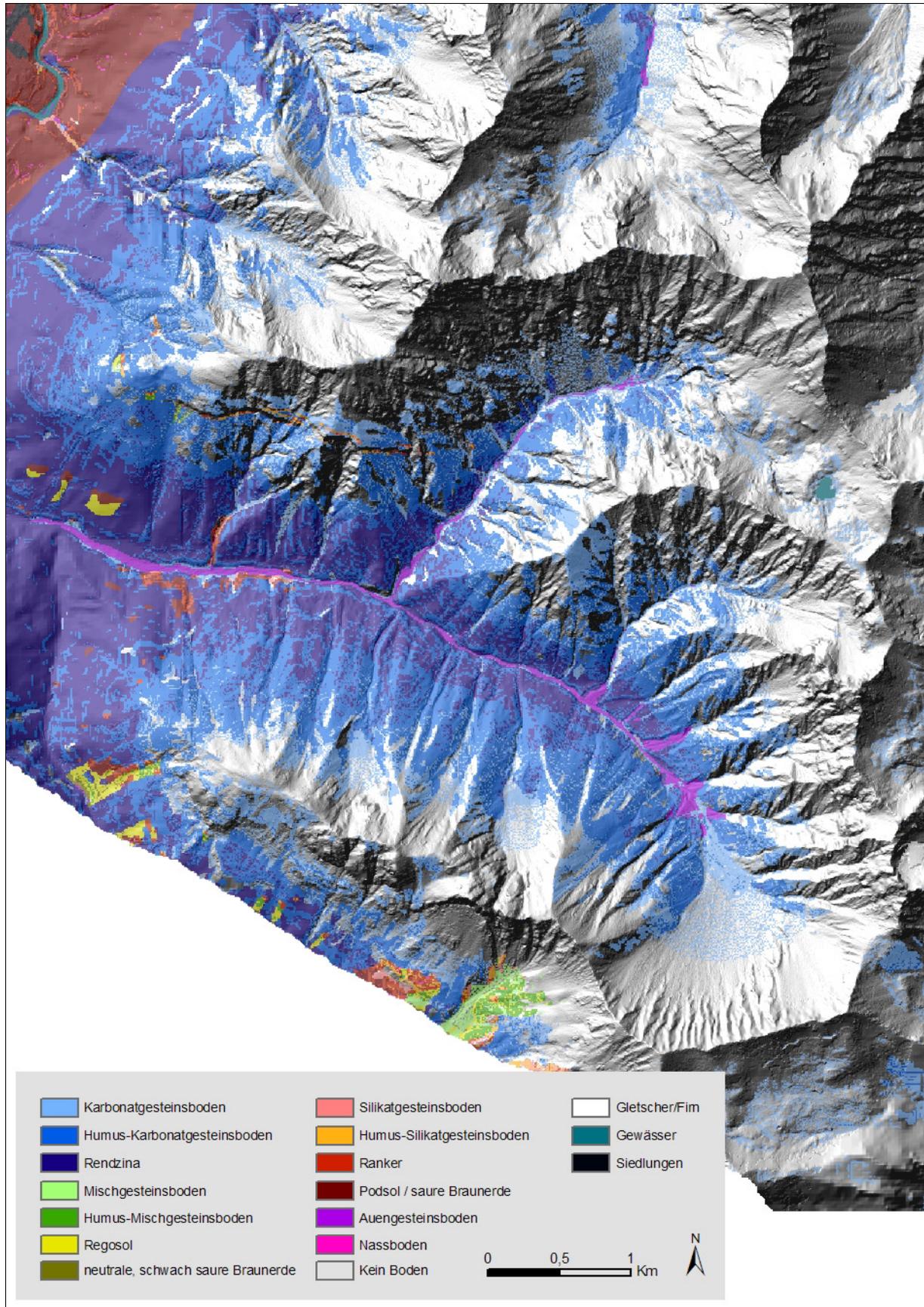
Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Val Cluozza, Valetta, Val Sassa, Val dal Diavel:



Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Unterengadins zwischen Brail und Zernez:



Die hypothetische Bodentypenkarte im Gebiet des Val Trupchun und Val Müschauns:



Seite 2 des Kleinen Aufnahmeprotokolls der WSL (WSL, 2001):

<p>1. Allgemeine Daten</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:15%;">Profil-Nr.</td> <td style="width:15%;">Projekt-Nr.</td> <td style="width:15%;">Landeskarte 1:25'000</td> <td style="width:15%;">Koordinaten</td> <td style="width:15%;">Datum</td> </tr> <tr> <td>1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Aufnahmegruppe: _____ Kanton: _____ Gemeinde: _____ Eigentümer: _____</p> <p>Photodokumentation: Film Nr.: _____ Photo Nr.: _____</p>	Profil-Nr.	Projekt-Nr.	Landeskarte 1:25'000	Koordinaten	Datum	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34					<p>2. Faktoren</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:15%;">Höhe ü. Meer (m)</td> <td style="width:15%;">Hangneigung (%)</td> <td style="width:15%;">Relief (Code)</td> <td style="width:15%;">Jahresniederschlag (mm)</td> </tr> <tr> <td>1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Exposition: _____</p> <p style="text-align: center;">Makro- bzw. Mikrorelief</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: right;">In Falllinie</p>	Höhe ü. Meer (m)	Hangneigung (%)	Relief (Code)	Jahresniederschlag (mm)	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15				<p>3. Bemerkungen (insbesondere Störungen):</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>																																																																				
Profil-Nr.	Projekt-Nr.	Landeskarte 1:25'000	Koordinaten	Datum																																																																																				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34																																																																																								
Höhe ü. Meer (m)	Hangneigung (%)	Relief (Code)	Jahresniederschlag (mm)																																																																																					
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15																																																																																								
<p>Bodenoberfläche</p> <p><input type="checkbox"/> roh <input type="checkbox"/> mit Skelett <input type="checkbox"/> mit Blöcken</p> <p>Vorgänge unter der Bodenoberfläche:</p> <p><input type="checkbox"/> stabil <input type="checkbox"/> leicht schiefe Bäume <input type="checkbox"/> bewegtes Skelett <input type="checkbox"/> bewegte Feinerde</p> <p><input type="checkbox"/> stark schiefe Bäume <input type="checkbox"/> zu bewegt für Bäume <input type="checkbox"/> Steinschlag <input type="checkbox"/> Blöcke (in Bewegung)</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Streuverlagerung <input type="checkbox"/> Rinnenerosion</p>	<p>Waldgesellschaft nach ELLENBERG und KLÖTZLI (1972):</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div> <p>Bestandesbeschreibung:</p> <p>Sträucher: _____ % Zwergsträucher: _____ %</p> <p>Krautschicht: _____ % Moosschicht: _____ %</p> <p>Deckungswert (%):</p>	<p>4. Beobachtete Streuung der Humusform mit Eintrag ins Oeko-Typogramm Humus:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;">L-F-H-Ahh-(E)-Ah</td> <td style="width:10%;">L-F-Ahh-Ah</td> <td style="width:10%;">L-Ah</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>9</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>11</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>13</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>15</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>17</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>19</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>21</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>23</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>25</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>27</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>29</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>31</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>33</td> <td>34</td> </tr> <tr> <td>34</td> <td>35</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>37</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>39</td> <td>40</td> </tr> </table>	L-F-H-Ahh-(E)-Ah	L-F-Ahh-Ah	L-Ah	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11	12	12	13	14	14	15	16	16	17	18	18	19	20	20	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29	30	30	31	32	32	33	34	34	35	36	36	37	38	38	39	40	<p>5. Profildifferenzierung sowie Verwitterungstendenz mit Eintrag ins Oeko-Typogramm Mineralerde:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;">Ah-C</td> <td style="width:10%;">(B)</td> <td style="width:10%;">(Bca)</td> <td style="width:10%;">B</td> <td style="width:10%;">Bv</td> <td style="width:10%;">E-Bt</td> <td style="width:10%;">E-Bh-Ble</td> <td style="width:10%;">G/S</td> </tr> <tr> <td>perkoliert</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>getrennt</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Ah-C	(B)	(Bca)	B	Bv	E-Bt	E-Bh-Ble	G/S	perkoliert								getrennt								<p>6. Nachbereitung</p> <p>Kontrolle: _____ Datum: _____</p> <p>Korrekturen: _____ Inhalt: _____</p> <p style="text-align: right;">Vsaum: _____</p>
L-F-H-Ahh-(E)-Ah	L-F-Ahh-Ah	L-Ah																																																																																						
2	3	4																																																																																						
4	5	6																																																																																						
6	7	8																																																																																						
8	9	10																																																																																						
10	11	12																																																																																						
12	13	14																																																																																						
14	15	16																																																																																						
16	17	18																																																																																						
18	19	20																																																																																						
20	21	22																																																																																						
22	23	24																																																																																						
24	25	26																																																																																						
26	27	28																																																																																						
28	29	30																																																																																						
30	31	32																																																																																						
32	33	34																																																																																						
34	35	36																																																																																						
36	37	38																																																																																						
38	39	40																																																																																						
Ah-C	(B)	(Bca)	B	Bv	E-Bt	E-Bh-Ble	G/S																																																																																	
perkoliert																																																																																								
getrennt																																																																																								

Regeln aller 9 Submodule des ‚Moduls der terrestrischen Böden‘:

Regeln des Submoduls 11 (silikatisches Substrat unter Wald und Gebüsch)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
2	TIEF	FLACH	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
3	TIEF	FLACH	KONVEX	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
7	TIEF	STEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
8	TIEF	STEIL	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
9	TIEF	STEIL	KONVEX	RANKER
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	RANKER
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	RANKER
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
20	HOCH	FLACH	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
21	HOCH	FLACH	KONVEX	RANKER
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RANKER
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	RANKER
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	RANKER
26	HOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 12 (silikatisches Substrat unter Wiesen und Weiden)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
2	TIEF	FLACH	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
3	TIEF	FLACH	KONVEX	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	RANKER
7	TIEF	STEIL	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
8	TIEF	STEIL	GERADE	RANKER
9	TIEF	STEIL	KONVEX	RANKER
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	PODSOL / SAURE BRAUNERDE
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	RANKER
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RANKER
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	RANKER
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	RANKER
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	RANKER
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	RANKER
20	HOCH	FLACH	GERADE	RANKER
21	HOCH	FLACH	KONVEX	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RANKER
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	SILIKATGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	SILIKATGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	SILIKATGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 13 (silikatisches Substrat unter Schutt- und Felsflächen)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
2	TIEF	FLACH	GERADE	HUMUS-SILIKATGESTEINSBODEN
3	TIEF	FLACH	KONVEX	SILIKATGESTEINSBODEN
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	SILIKATGESTEINSBODEN
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	SILIKATGESTEINSBODEN
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
7	TIEF	STEIL	KONKAV	SILIKATGESTEINSBODEN
8	TIEF	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
9	TIEF	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	SILIKATGESTEINSBODEN
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	SILIKATGESTEINSBODEN
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	KEIN BODEN
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	SILIKATGESTEINSBODEN
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	SILIKATGESTEINSBODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	SILIKATGESTEINSBODEN
20	HOCH	FLACH	GERADE	KEIN BODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	KEIN BODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	KEIN BODEN
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KEIN BODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN

Regeln des Submoduls 21 (gemischt silikatisch-karbonatisches Substrat unter Wald und Gebüsch)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
2	TIEF	FLACH	GERADE	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
3	TIEF	FLACH	KONVEX	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	REGOSOL
7	TIEF	STEIL	KONKAV	REGOSOL
8	TIEF	STEIL	GERADE	REGOSOL
9	TIEF	STEIL	KONVEX	REGOSOL
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	REGOSOL
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	REGOSOL
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	REGOSOL
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	REGOSOL
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	REGOSOL
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	REGOSOL
20	HOCH	FLACH	GERADE	REGOSOL
21	HOCH	FLACH	KONVEX	REGOSOL
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	REGOSOL
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	REGOSOL
26	HOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 22 (gemischt silikatisch-karbonatisches Substrat unter Wiesen und Weiden)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
2	TIEF	FLACH	GERADE	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
3	TIEF	FLACH	KONVEX	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	REGOSOL
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	REGOSOL
7	TIEF	STEIL	KONKAV	REGOSOL
8	TIEF	STEIL	GERADE	REGOSOL
9	TIEF	STEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	NEUTRALE/SCHWACH SAURE BRAUNERDE
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	REGOSOL
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	REGOSOL
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	REGOSOL
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	REGOSOL
20	HOCH	FLACH	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	REGOSOL
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	MISCHGESTEINSBODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	MISCHGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	MISCHGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 23 (gemischt silikatisch-karbonatisches Substrat unter Schutt- und Felsflächen)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
2	TIEF	FLACH	GERADE	HUMUS-MISCHGESTEINSBODEN
3	TIEF	FLACH	KONVEX	MISCHGESTEINSBODEN
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	MISCHGESTEINSBODEN
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	MISCHGESTEINSBODEN
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
7	TIEF	STEIL	KONKAV	MISCHGESTEINSBODEN
8	TIEF	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
9	TIEF	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	MISCHGESTEINSBODEN
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	MISCHGESTEINSBODEN
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	KEIN BODEN
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	KEIN BODEN
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KEIN BODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	MISCHGESTEINSBODEN
20	HOCH	FLACH	GERADE	KEIN BODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	KEIN BODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	KEIN BODEN
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KEIN BODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN

Regeln des Submoduls 31 (karbonatisches Substrat unter Wald und Gebüsch)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	RENDZINA
2	TIEF	FLACH	GERADE	RENDZINA
3	TIEF	FLACH	KONVEX	RENDZINA
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	RENDZINA
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	RENDZINA
7	TIEF	STEIL	KONKAV	RENDZINA
8	TIEF	STEIL	GERADE	RENDZINA
9	TIEF	STEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	RENDZINA
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	RENDZINA
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	RENDZINA
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	RENDZINA
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	RENDZINA
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	RENDZINA
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	RENDZINA
20	HOCH	FLACH	GERADE	RENDZINA
21	HOCH	FLACH	KONVEX	RENDZINA
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 32 (karbonatisches Substrat unter Wiesen und Weiden)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	RENDZINA
2	TIEF	FLACH	GERADE	RENDZINA
3	TIEF	FLACH	KONVEX	RENDZINA
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	RENDZINA
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
7	TIEF	STEIL	KONKAV	RENDZINA
8	TIEF	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
9	TIEF	STEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	RENDZINA
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	RENDZINA
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	RENDZINA
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
20	HOCH	FLACH	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	KARBONATGESTEINSBODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN

Regeln des Submoduls 33 (karbonatisches Substrat unter Schutt- und Felsflächen)				
NR	HÖHE	NEIGUNG	CURVATURE	BODENTYP
1	TIEF	FLACH	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
2	TIEF	FLACH	GERADE	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
3	TIEF	FLACH	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
4	TIEF	MITTELSTEIL	KONKAV	KARBONATGESTEINSBODEN
5	TIEF	MITTELSTEIL	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
6	TIEF	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
7	TIEF	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
8	TIEF	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
9	TIEF	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
10	MITTELHOCH	FLACH	KONKAV	HUMUS-KARBONATGESTEINSBODEN
11	MITTELHOCH	FLACH	GERADE	KARBONATGESTEINSBODEN
12	MITTELHOCH	FLACH	KONVEX	KARBONATGESTEINSBODEN
13	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	KARBONATGESTEINSBODEN
14	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KEIN BODEN
15	MITTELHOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
16	MITTELHOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
17	MITTELHOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
18	MITTELHOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN
19	HOCH	FLACH	KONKAV	KARBONATGESTEINSBODEN
20	HOCH	FLACH	GERADE	KEIN BODEN
21	HOCH	FLACH	KONVEX	KEIN BODEN
22	HOCH	MITTELSTEIL	KONKAV	KEIN BODEN
23	HOCH	MITTELSTEIL	GERADE	KEIN BODEN
24	HOCH	MITTELSTEIL	KONVEX	KEIN BODEN
25	HOCH	STEIL	KONKAV	KEIN BODEN
26	HOCH	STEIL	GERADE	KEIN BODEN
27	HOCH	STEIL	KONVEX	KEIN BODEN

Profilprotokoll N42:

Profil-Nr.	N42	Oberboden [Horiz.]	1	Nebenwurzelraum [Horiz.]	2	Humusformindex	-
Kanton	GR	Säuregrad	7	Säuregrad	7	Humusform	-
Landeskarte (Blatt-Nr.)	1218	Karbonat Feinerde	1	Karbonat Feinerde	2	Variante	-
X-Koordinate	811863	Hydromorphie	0	Hydromorphie	0		
Y-Koordinate	171348	Intensität Feinwurzeln	3	Intensität Feinwurzeln	1	Bodentyp	Mischgesteinsbo
Datum	17 9 04	Feinerde	3	Feinerde	2	Übergang	-
Vetter [Code]	4	Skelettgehalt	5	Skelettgehalt	6	Mächtigkeit F+H [cm]	-
Höhe [m.ü.M.]	1864	Lagerungsdichte	2	Lagerungsdichte	2	Durchmischungstiefe [cm]	1
Exposition	NW	Hauptwurzelraum [Horiz.]	1	Gesamtprofil		Hauptwurzelraum [cm]	5
Hangneigung [%]	15	Säuregrad	7	Profiltiefe [cm]	25	Nebenwurzelraum [cm]	25
Relief [Code]	3	Karbonat Feinerde	1	Gründigkeit [Code]	2	Limite Wurzelraum [Code]	0
Niederschlag [mm/Jahr]	974	Hydromorphie	0	Grundnässe [Code]	-	Kalkgrenze [cm]	0
Geologie	Hangschutt	Intensität Feinwurzeln	3	Pseudovergleyung [Code]	-	nutzbare Feldkap. [mm]	7
Valdgesellschaft	65	Feinerde	3	weitere Angaben		totale Feldkap. [mm]	11
Einheit Bodeneignungskarte	U3	Skelettgehalt	5			kleinste Durchlässigkeit	4
		Lagerungsdichte	2				
Serienname	SNP-Profil	Anzahl Horizonte:	2				
Bemerkungen							
Profil-Nr.	N42	Horizontierung		pH-Hellige		pH [CaCl2]	
F		Haupthorizont		Karbonat Skelett		Feinerde (Pipettenmethode)	
E		Ausprägung		Karbonat Feinerde		nFK [mm/cm]	
D		Wechsel Geologie		Kalk-Ausscheidungen		FK [mm/cm]	
C		Übergang		Kalkgrenze [cm]	0	Durchlässigkeit [Code]	
B		Ausprägung		Hauptwurzelraum	5	Tongehalt [Code]	
A		Übergang		Nebenwurzelraum	25		
[L]	01	Komplex		Limite Wurzelraum	0		
1	A]Cv	Ausprägung	82 3 0	Durchwurzelungstiefe	25		
2	Cv	Übergang	82 1 0	Starkwurzeln	0		
3		Ausprägung		Grobwurzeln	0		
4		Übergang		Feinwurzeln	0		
5		Komplex		Baumarten	0		
6		Ausprägung		Farbe	0		
7		Übergang		(Value)			
8		Komplex		(Chroma)			
9		Ausprägung					
10		Übergang					

Profilprotokoll N08:

Profil-Nr.	N08	Oberboden [Horiz.]	1	Nebenwurzelraum [Horiz.]	3	Humusformindex	0.83
Kanton	GR	Säuregrad	5	Säuregrad	6	Humusform	3
Landeskarte (Blatt-Nr.)	1218	Karbonat Feinerde	0	Karbonat Feinerde	3	Variante	1
X-Koordinate	810245	Hydromorphie	0	Hydromorphie	-		
Y-Koordinate	169641	Intensität Feinwurzeln	3	Intensität Feinwurzeln	0	Bodentyp	Verbraunter Rego
Datum	9 7 04	Feinerde	4	Feinerde	3	Übergang	-
Vetter [Code]	2	Skelettgehalt	3	Skelettgehalt	5	Mächtigkeit F+H [cm]	3
Höhe [m.ü.M.]	1904	Lagerungsdichte	2	Lagerungsdichte	0	Durchmischungstiefe [cm]	10
Exposition	SW	Hauptwurzelraum [Horiz.]	2	Gesamtprofil		Hauptwurzelraum [cm]	40
Hangneigung [%]	35	Säuregrad	5	Profiltiefe [cm]	60	Nebenwurzelraum [cm]	-
Relief [Code]	3	Karbonat Feinerde	1	Gründigkeit [Code]	-	Limite Wurzelraum [Code]	2
Niederschlag [mm/Jahr]	974	Hydromorphie	0	Grundnässe [Code]	-	Kalkgrenze [cm]	10
Geologie	Moräne	Intensität Feinwurzeln	3	Pseudovergleyung [Code]	-	nutzbare Feldkap. [mm]	52
Valdgesellschaft	67	Feinerde	3	weitere Angaben		totale Feldkap. [mm]	89
Einheit Bodeneignungskarte	U7	Skelettgehalt	3			kleinste Durchlässigkeit	4
		Lagerungsdichte	3				
Serienname	SNP-Profil	Anzahl Horizonte:	3				
Bemerkungen							
Profil-Nr.	N08	Horizontierung		pH-Hellige		pH [CaCl2]	
F		Haupthorizont		Karbonat Skelett		Feinerde (Pipettenmethode)	
E		Ausprägung		Karbonat Feinerde		nFK [mm/cm]	
D		Wechsel Geologie		Kalk-Ausscheidungen	8	FK [mm/cm]	
C		Übergang		Kalkgrenze [cm]	0	Durchlässigkeit [Code]	
B		Ausprägung		Hauptwurzelraum	40	Tongehalt [Code]	
A		Übergang		Nebenwurzelraum	2		
[L]	10	Komplex		Limite Wurzelraum	2		
1	Ah	Ausprägung	42 1 0	Durchwurzelungstiefe	33		
2	(B)C	Übergang	40 1 1	Starkwurzeln	0		
3	Cv	Ausprägung	82 1 0	Grobwurzeln	0		
4		Übergang		Feinwurzeln	0		
5		Komplex		Baumarten	0		
6		Ausprägung		Farbe	0		
7		Übergang		(Value)			
8		Komplex		(Chroma)			
9		Ausprägung					
10		Übergang					

