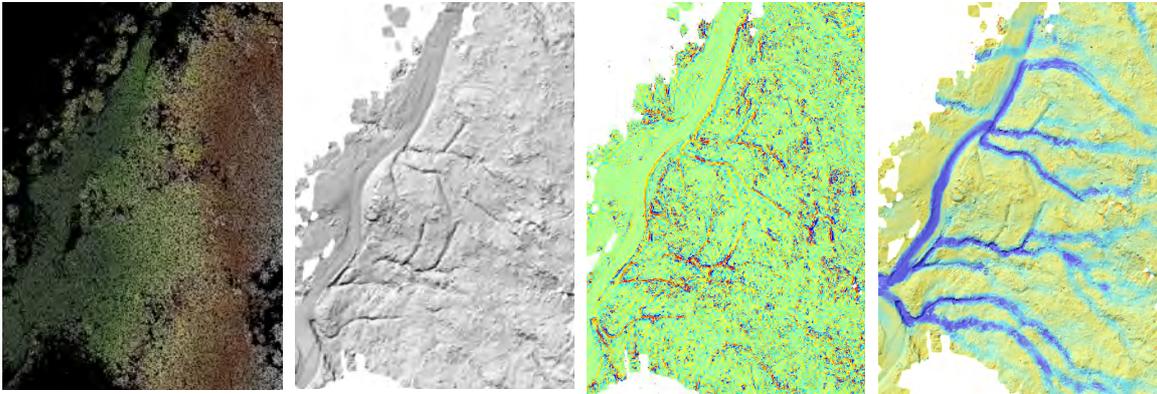


Modellierung der Bodenacidität mit terrestrischen LiDAR Daten im Alptal



Anja Lenggenhager

Matrikel-Nr. 08-727-315

Fakultätsvertretung:

Prof. Dr. Ross Purves

Betreuung:

Prof. Dr. Ross Purves

Andri Baltensweiler

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Zürcherstrasse 111

8903 Birmensdorf

andri.baltensweiler@wsl.ch

Zürich, 30. April 2014

Titelbild:

„Von den terrestrischen LiDAR Rohdaten bis hin zur Vorhersage der Bodenacidität.“

Von links nach rechts:

Ausgedünnte Punktdaten, nach Höhe klassifiziert; neu generiertes digitales Geländemodell (20cm Auflösung); Abgeleiteter Topographischer Positionsindex (geglättet mit Radius 3 Zellen); Vorhersage der Bodenacidität. © WSL 2013/2014.

Kontakt

Autorin

Anja Lenggenhager
Auwiesenstrasse 36
9030 Abtwil
anja.lenggenhager@bluewin.ch

Betreuer

Prof. Dr. Ross Purves
Geocomputation,
Geographisches Institut
Universität Zürich-Irchel
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich
ross.purves@geo.uzh.ch

Andri Baltensweiler
Gruppe GIS,
Forschungseinheit Waldressourcen & Waldmanagement
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
andri.baltensweiler@wsl.ch

Dank

An dieser Stelle möchte ich mich bei Andri Baltensweiler und Prof. Dr. Ross Purves für Ihre stetige Unterstützung und die ausserordentliche Betreuung der Arbeit bedanken. Ich habe die zahlreichen Ratschläge, die konstruktive Kritik und die interessanten Diskussionen sehr geschätzt und viel profitieren können. Vielen Dank!

Ein weiterer grosser Dank geht an

- Dr. Marielle Fraefel Kocher für die hilfreichen Kommentare und ihr offenes Ohr.
- Lorenz Walthert für sein bodenkundliches Fachwissen.
- Christan Ginzler für die Erfassung und Bereitstellung der terrestrischen LiDAR Daten sowie die vielen Hilfestellungen und Ideen rund um die Bearbeitung dieser Daten.
- Patrick Thee für die Einmessungen im Feld und die Beantwortung verschiedener technischer Fragen diesbezüglich.
- Flurin Sutter, Marco Walser und Roger Köchli sowie an das gesamten Feld-Team für die Erhebung der bodenkundlichen Daten und die Einmessungen.
- meine Büronachbarn/in für ihre technischen Unterstützungen und die angenehme Arbeitsatmosphäre.
- die WSL für die zur Verfügung gestellten Daten sowie für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes mit Rechengeräte.
- Lea Reusser und Jonas Schuler für die Durchsicht dieser Arbeit.
- meine Studienkollegen/innen für den wertvollen und vielseitigen Austausch.
- Familie und Freunde/innen für Ihre Geduld und die moralische Unterstützung.

Anja Lenggenhager
Zürich, April 2014

Zusammenfassung

Die Nachfrage nach hochaufgelösten und flächendeckenden digitalen Bodeninformationen ist in der Schweiz aufgrund der zunehmenden Knappheit der Ressource Boden bedeutend gross. Die vorliegende Arbeit zeigt einen möglichen methodischen Ansatz für die Gewinnung von umfassenden Bodeninformationen am Beispiel der Modellierung der Bodenacidität auf. Die Fallstudie bezieht sich auf die Beschreibung der Bodenacidität auf einer Untersuchungsfläche im Alptal, welche primär durch hohe Niederschlagsmengen sowie Flyschschichten beeinflusst wird. Das daraus resultierende Mikrorelief hat einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenacidität. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Bodenacidität zu modellieren und dabei den Fokus auf die Skalendiskussion zu legen. Zentral waren die Fragen nach dem optimalen Skalenbereich sowie der optimalen Auflösung für diese spezifische Modellierung.

Im ersten Teil der Arbeit wurden genaue digitale Geländemodelle mit verschiedenen Auflösungen (20, 60, 80, 200, 400cm) aus terrestrischen LiDAR Daten gewonnen. Dabei lag der Fokus auf der Filterung der Laserpunkte und somit auf der möglichst genauen Extraktion von Bodenpunkten. Dafür wurden zwei verschiedene Softwares (LasTools und FUISON/LDV) verwendet. Damit einhergehend konnte die Frage nach dem besten methodischen Ansatz für die Bearbeitung der terrestrischen LiDAR Daten im Kontext des vorliegenden Untersuchungsgebietes ansatzweise jedoch nicht vollständig beantwortet werden, da dafür eine intensivere Analyse der spezifischen Filteralgorithmen sowie ein umfassender Vergleich mehrerer Softwares und Methoden nötig wäre. Die besten Resultate bezüglich der Qualität der Geländemodelle wurden mit den Standardeinstellungen der LasTools Software erzielt. Der berechnete Fehlerwert (RMSE) lag bei 17cm. Jedoch zeigten sich vor allem bezüglich der Filterung der terrestrischen Laserdaten aufgrund des markant ausgeprägten Reliefs im Untersuchungsgebiet erhebliche Herausforderungen.

Basierend auf den besten neu generierten digitalen Geländemodellen wurden verschiedene, erklärende Variablen berechnet. Wichtig war dabei, dass vor allem die topographischen und hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes durch die abgeleiteten Attribute charakterisiert wurden. Um Aussagen über den optimalen Skalenbereich für die Modellierung der Bodenacidität zu gewinnen, wurden die berechneten Attribute mit unterschiedlichen Nachbarschaftsgrössen geglättet.

Die Modellierung erfolgte mit einer multiplen linearen Regressionsanalyse. Für die vorgängige Auswahl der Variablen wurden Korrelationsanalysen sowie eine schrittweise Variablenselektion mit dem Bayesschen Informationskriterium (BIC) verwendet. Dadurch konnte herausgefunden werden, welche der erklärenden Variablen den grössten Einfluss auf die Modellierung der Bodenacidität haben. Es wurde für jedes der unterschiedlich aufgelösten Geländemodelle mit den jeweiligen abgeleiteten und geglätteten Variablen eine eigene Regressionsanalyse durchgeführt. Abschliessend wurden die Resultate (statistische Werte) dieser Analysen verglichen und das beste Modell bestimmt.

Mit dem am höchsten aufgelösten digitalen Geländemodell (20cm) und den erklärenden Variablen Horizontalkrümmung, Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades sowie einer Interaktionsvariable zwischen dem Topographischen Positionsindex und der Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades konnte die Modellvariabilität zu 54% erklärt werden (multiples Bestimmtheitsmass). Die Skalenbereiche verhielten sich dabei für die topographischen Eigenschaften im kleinräumlichen Bereich (20cm) und für die hydrologischen Eigenschaften in einem grösseren Skalenbereich (240cm).

Um zusätzlich Aussagen über den Mehrwert von terrestrischen LiDAR Daten für Bodenmodellierungen zu erhalten, wurde als Vergleichsmodell das digitale Geländemodell Swisalti3D von Swisstopo mit einer Auflösung von 200cm verwendet. Die Resultate dieses Vergleichs zeigen auf, dass für die spezifische Modellierung von Bodeneigenschaften hochaufgelöste und genaue Geländedaten notwendig sind.

Die abschliessende Vorhersage der Bodenacidität über das gesamte Untersuchungsgebiet zeigt,

dass mit dem besten Regressionsmodell die markante Topographie sowie deren gegensätzlicher Einfluss auf den pH im Oberboden abgebildet werden konnte.

Die Resultate und Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen auf, dass bezüglich der Skalendiskussion aber auch im Bezug auf die Verwendung und Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten viel Potential vorhanden ist. Dennoch konnten auch einige Herausforderungen und Notwendigkeiten hervorgehoben werden, die nur durch intensive Analysen und Weiterentwicklungen zu zukünftigen Verbesserungen von Bodenmodellierungen führen können und somit die Nachfrage nach umfassenden Bodeninformationen bewältigen können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kontext und Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	1
1.2.1	Terrestrisches Laser Scanning	1
1.2.2	Digitale Bodenkartierung	3
1.3	Untersuchungsgebiet	5
1.4	Zielsetzung und Fragestellungen	8
1.5	Aufbau der Arbeit	9
2	Methodik Teil I – Generierung der digitalen Geländemodelle	11
2.1	Verwendete Software	11
2.1.1	LasTools	11
2.1.2	Fusion	12
2.2	Datengrundlage	13
2.2.1	FARO Focus 3D 120	13
2.2.2	Terrestrische LiDAR Daten	15
2.2.3	Datenqualität	17
2.3	Datenbearbeitung	18
2.3.1	Datenaufbereitung	18
2.3.2	Filterung	19
2.3.3	Modellgenerierung	20
2.4	DTM Validierung	21
2.4.1	Referenzdaten	21
2.4.2	Quantitative Validierung	22
2.4.3	Qualitative Validierung	22
3	Methodik Teil II – Modellierung der Bodenacidität	25
3.1	Datengrundlage	25
3.1.1	pH-Daten	25
3.1.2	Erklärende Variablen	29
3.1.3	Swissalti3D	31
3.2	Datenaufbereitung	31
3.2.1	Glättung der erklärenden Variablen	32
3.2.2	Interaktionsvariablen	33
3.3	Statistische Modellierung	34
3.3.1	Variablenselektion	34
3.3.2	Multiple lineare Regressionsanalyse	35
3.3.3	Validierung der Bodenmodellierung	36
4	Resultate	37
4.1	Digitale Geländemodelle	37
4.1.1	Filterung	37
4.1.2	Modellgenerierung	39
4.1.3	DTM Validierung	40
4.1.4	Zusätzliche Geländemodelle	44
4.2	Bodenaciditätsmodellierung	45
4.2.1	Variablenselektion	45
4.2.2	Multiple lineare Regressionsanalyse	46
4.2.3	Validierung der Bodenmodellierung	48
4.2.4	Vorhersage der Bodenacidität	49
5	Diskussion	51
5.1	Diskussion der Fragestellungen	51

5.1.1	Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten	51
5.1.2	Skalenbereich und Auflösung der Bodenmodellierung	54
5.1.3	Mehrwert der terrestrischen LiDAR Daten für Bodenmodellierungen	57
5.2	Bodenacidität im Untersuchungsgebiet	59
6	Schlussfolgerung und Ausblick	61
6.1	Erreichtes	61
6.2	Erkenntnisse	61
6.3	Ausblick	62
Anhang		
A	Übersicht Regressionsmodelle	71
B	Informationen zum Inhalt der beiliegenden DVD	79

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Standort der LWF-Fläche im Alptal.	6
Abb. 2:	Ausschnitt Karte LWF-Flächen Schweiz (WSL, 2013b).	6
Abb. 3:	LWF-Fläche Alptal.	6
Abb. 4:	Grosser Mythen.	6
Abb. 5:	Idealisiertes Bestandsprofil (Tanne, Fichte, Schachtelhalm) mit den für das Untersuchungsgebiet typischen Kuppen- und Muldenlagen (Frehner et al., 2005).	7
Abb. 6:	Vegetations- und Topographiebild im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes.	8
Abb. 7:	Schematische Darstellung der Arbeitsschritte.	10
Abb. 8:	FARO Focus 3D 120 im Einsatz.	14
Abb. 9:	Markierungskugel im Feld.	15
Abb. 10:	Dichte der ausgedünnten terrestrischen Laserpunktclouds sowie Standorte des FARO Focus 3D 120 Laserscanners im Feld.	16
Abb. 11:	Punktcloud nach der Ausdünnung klassifiziert nach ihrer Höhe (Z). Die wenigen Gebiete mit mangelnden Daten sind deutlich zu sehen.	17
Abb. 12:	Prozesskette des terrestrischen Laser Scanning basierend auf Kersten et al. (2012).	18
Abb. 13:	pH-Wertebereich und Einstufung (Blume et al., 2010).	25
Abb. 14:	Sample Design der Bodenprofile.	26
Abb. 15:	Bodenprofil Typ Braunerde.	27
Abb. 16:	pH-Werte der Bodenprofile im Untersuchungsgebiet.	28
Abb. 17:	Beispiel Mulde (Bodenprofil BS25).	29
Abb. 18:	Beispiel Kuppe (Bodenprofil BS605).	29
Abb. 19:	Verteilung der pH-Daten.	29
Abb. 20:	Topographischer Feuchtigkeitsindex, 20cm Auflösung (original).	31
Abb. 21:	Topographischer Positionsindex, Glättung mit Radius von 3 Zellen.	31
Abb. 22:	Topographischer Positionsindex (originale Auflösung 20cm) mit verschiedenen Glättungen.	33
Abb. 23:	Foto des DTM Ausschnitts der in Tab. 8 dargestellten Filterproblematik	37
Abb. 24:	Ausschnitt digitales Geländemodell auf Basis der Punktcloudfilterung mit FUISSON, Ausreisser sind deutlich erkennbar.	39
Abb. 25:	Relief DTMa01 (Nr. 11).	39
Abb. 26:	Relief DTMa06 (Nr. 13).	39
Abb. 27:	Exemplarische Korrelationsmatrix – Korrelation zwischen den wichtigsten erklärenden Variablen (abgeleitet vom digitalen Geländemodell DTMa01 mit einer Auflösung von 20cm) und der abhängigen Variable pH.	46
Abb. 28:	Statistische Diagramme des DTMa01 (20cm).	48
Abb. 29:	Kontinuierliche pH-Vorhersage über das gesamte Untersuchungsgebiet.	49
Abb. 30:	Ausschnitt ausgedünnte Punktcloud.	53
Abb. 31:	Ausschnitt klassifizierte Punktcloud.	53
Abb. 32:	Horizontalkrümmung.	55
Abb. 33:	Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades.	55
Abb. 34:	Resultate (Bestimmtheitsmasse) der Bodenaciditätsmodellierung mit verschiedenen Auflösungen.	56
Abb. 35:	Vergleich TPI (geglättet mit Radius 2 Zellen) zwischen dem Geländemodell Swisalti3D und dem neu generierten DTMa03 (beide mit einer Auflösung von 200cm).	58
Abb. 36:	Bodenaciditätskarte – kontinuierliche pH-Vorhersage mit gemessenen Boden-pH Daten der Profilstandorte.	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Exemplarische Übersicht von in der Literatur verwendeter Algorithmen für die Anwendung auf luftgestützte (ALS) und terrestrische (TLS) LiDAR Daten im bewaldeten Gebiet. _____	3
Tab. 2:	Übersicht über eine Auswahl der wichtigsten LasTools und ihrer Parameter (Rapidlasso, 2013). _____	12
Tab. 3:	Übersicht der beiden verwendeten Tools mit einer Auswahl der wichtigsten Parameter der FUSION Software (FUSION/LDV, 2013; McGaughey, 2013). _	13
Tab. 4:	Technische Spezifikationen des verwendeten terrestrischen Laserscanners FARO Focus 3D 120 (FARO, 2013a; Dassot et al., 2011; Shan & Toth, 2008). _	14
Tab. 5:	Übersicht und Beschreibung der abgeleiteten erklärenden Variablen (Wilson & Gallant, 2000). _____	30
Tab. 6:	Übersicht über die verwendeten Nachbarschaftsgrößen (in Zellen) und Statistiktypen zur Glättung der erklärenden Variablen der verschiedenen Geländemodelle mit den daraus folgenden Skalenbereichen. _____	32
Tab. 7:	Interaktionsvariablen: Multiplikation zwischen erklärender Variable 1 und 2. _	34
Tab. 8:	Exemplarische Übersicht über verschiedene DTM Ausschnitte (Auflösung 20cm) mit den dazugehörigen Punktdaten, Klassifikation in Boden (rot) - und Nichtbodenpunkte (gelb), im FugroViewer. _____	38
Tab. 9:	Gesamte Übersicht der generierten digitalen Geländemodellen mit einer Auflösung von 20 und 30cm. _____	40
Tab. 10:	Übersicht der quantitativen Validierung ausgewählter digitaler Geländemodelle _____	41
Tab. 11:	Bewertungsschema qualitative Validierung Teil I – Verteilung der Punkte (Pts.). _____	41
Tab. 12:	Exemplarische Übersicht der qualitativen Validierung ausgewählter digitaler Geländemodelle. _____	42
Tab. 13:	Exemplarischer Ausschnitt aus der qualitativen Validierung – Vergleich der Topographie DTM und Feld (Bild)._____	43
Tab. 14:	Zusammenfassende Übersicht der Modellvalidierung (dreizehn beste Modelle)._____	44
Tab. 15:	Übersicht über die zusätzlich generierten digitalen Geländemodelle _____	44
Tab. 16:	Ausschnitt aus der Variablenselektion anhand der Korrelationskoeffizienten – die ausgewählten Variablen für die Modellierung sind blau markiert. _____	45
Tab. 17:	Übersicht über die besten Modelle mit verschiedenen Auflösungen. _____	47
Tab. 18:	Übersicht Kreuzvalidierung. _____	48

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

In der Schweiz ist der Boden zunehmend eine begrenzte Ressource. Der Boden weist vielfältige ökologische sowie ökonomische Funktionen auf, die grundlegend sowohl für unsere Lebens- als auch unsere Umwelt sind. Ein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Boden ist deshalb von grösster Wichtigkeit (BAFU, 2013). Die Nachfrage nach umfassenden Bodeninformationen ist demnach sehr gross. Das aktuelle Projekt „Kartierung von Bodeneigenschaften zur Beurteilung von Bodenfunktionen auf regionaler Skala“ fokussiert sich auf die Gewinnung von räumlichen Informationen über verschiedene Bodeneigenschaften in der Schweiz. Dieses Projekt ist in das nationale Forschungsprogramm NFP 68 – Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden (Schweizerischer Nationalfonds, 2013) integriert und stellt den Hintergrund für diese Arbeit dar. Neben der Erhebung von hochaufgelösten räumlichen Bodeninformationen ist die Erarbeitung einer Grundlage für die Bewertung von Bodenfunktionen von Schweizer Böden ein weiteres Ziel dieses Projektes. Dabei werden Methoden der digitalen Bodenkartierung (McBratney et al., 2003) verwendet um hochaufgelöste digitale Karten von Bodeneigenschaften für eine effiziente und flächendeckende Abfrage von Bodeninformationen zu generieren. Das Projekt soll zudem einen Einblick geben, wie mit der steigenden Nachfrage nach detaillierten räumlichen Informationen über Böden in der Schweiz in Zukunft umgegangen werden kann (WSL, 2013a).

Grundlegend für diese Ziele ist die Verwendung von umfassenden und hochaufgelösten Daten für die Generierung von detaillierten digitalen Geländemodellen als primäre Grundlage für die digitalen Bodenkartierungen. Die Technologie des terrestrischen Laser Scanning bietet sich für die Erhebung solcher Daten unter anderem aufgrund der schnellen Datengewinnung sowie -verarbeitung an. Dennoch ist erst wenig über die Eignung von terrestrischen LiDAR Daten für Bodenkartierungen bekannt (Barneveld et al., 2013). Die wissenschaftliche Motivation dieser Arbeit liegt deshalb in der Verwendung dieser terrestrischen LiDAR Daten für die spezifische Bodenmodellierung. Neben dem Mehrwert dieser Daten ist die damit einhergehende Frage nach dem optimalen Skalenbereich sowie der optimalen Auflösung für diese Modellierung von grossem Interesse. Im Rahmen der digitalen Bodenkartierung ist die Skalendiskussion von aktueller Bedeutung (Boettinger et al., 2010). Die zunehmende Verfügbarkeit von hochaufgelösten digitalen Geländemodellen beinhaltet wertvolle Vorteile, erfordert jedoch auch ein wachsendes Verständnis über deren Einfluss auf die Modellierungen als auch eine stetige Entwicklung und Verfeinerung der Methoden (Wilson, 2012). Des Weiteren stellt sich die Frage, ob hochaufgelöste digitale Geländemodelle die beste Wahl für die digitale Bodenkartierung sind und ob sie zu einer Verbesserung der Modellierungen führen können (Cavazzi et al., 2013).

Die Einbettung dieser Arbeit in den aktuellen wissenschaftlichen Kontext sowie die Verknüpfung von verschiedenen Forschungsbereichen beinhaltet viele interessante und motivierende Herausforderungen und bietet Potential für neue Erkenntnisse.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Terrestrisches Laser Scanning

Im Vergleich zu den klassischen Vermessungsmethoden wie beispielsweise die Photogrammetrie, das GPS oder die Tachymetrie, haben sich die Technologien rund um das Laser Scanning in den letzten Jahren stark entwickelt und für die Erfassung von Umweltdaten etabliert (Schulz & Zogg, 2006). Die LiDAR (Light Detection And Ranging) Technologie benutzt Laserstrahlen für die optische Distanzmessung. Das Grundprinzip beruht dabei auf der Aussendung, der Reflexion sowie dem Empfang des von einem Zielobjekt reflektierten Laserstrahl des Scaninstrumentes (Baltsavias, 1999; Dassot et al., 2011). Terrestrische Laserscanner sind seit den 1990ern kommerziell verfügbar (Lichti et al., 2002) und entwickeln sich seither ständig weiter (Dassot et al., 2011). Sie bestehen für die Erfassung von hochaufgelösten 3D Punktdaten aus einer Synthese von verschiedenen Technologien (Fowler & Kadatskiy, 2011). Jeder durch den Laserstrahl erfasste Punkt weist verschiedene Informationen auf, wobei die Intensität und der

Farbwert neben den 3D-Koordinaten zu den wichtigsten Attributen gehören. Die Vielzahl an dazugehörigen Informationen ermöglicht im späteren Verlauf der Datenverwendung die Unterscheidung sowie auch die Klassifizierung von Objekten (Schulz & Zogg, 2006) (Dassot et al., 2011). Diverse Studien beschreiben die grundlegenden Prinzipien der LiDAR Technologie detailliert (Shan & Toth, 2008; Teza et al., 2007).

Terrestrische Laserscanner werden vielseitig und in verschiedenen Bereichen für die Vermessung eingesetzt. Abellán et al. (2014) geben beispielsweise einen guten Überblick über die Verwendung von terrestrischen LiDAR Systemen für geologische Untersuchungen wie beispielsweise Felshanginstabilitäten. Auch im Bereich der Waldwissenschaft werden terrestrische Laserscanner oft verwendet, beispielsweise für die detaillierte Dokumentation von Wäldern (Bestand, Ökologie) und Böden (Liang et al., 2014; Dassot et al., 2011) sowie die Gewinnung von bedeutenden Informationen auf verschiedenen räumlichen Skalen (Kint et al., 2009) um das Verständnis und das Wissen über ökologische Prozesse im Wald zu verbessern (Dassot et al., 2011). Umfassende Beispiele für den vielseitigen Einsatz von terrestrischen LiDAR Systemen lassen sich in der jüngsten Literatur finden (Brodu & Lague, 2012; McDaniel, 2012; Andújar et al., 2013; Ozdemir et al., 2013).

Die Charakterisierung der Erdoberfläche ist grundlegend für die Untersuchung von verschiedenen Landschaftsprozessen. Die Möglichkeit, diese Prozesse zu modellieren wird dabei stark durch die Qualität und Auflösung der verwendeten digitalen Geländemodelle beeinflusst. Hochaufgelöste terrestrische Laserpunktclouds können dazu beitragen, ein möglichst realgetreues Abbild der Erdoberfläche zu generieren. Dafür müssen jedoch zuerst Punkte, welche nicht die eigentliche Erdoberfläche darstellen also sogenannte Nichtbodenpunkte wie Vegetation oder andere Objekte entfernt werden (Sharma et al., 2010) um die gesuchte Oberfläche zu isolieren und um die Daten für die weitere Analyse zu optimieren (Reduktion des Datenvolumens) (Abellán et al., 2014). Die Identifikation und Beseitigung dieser Punkte kann sehr schwierig und zeitaufwendig sein (Sharma et al., 2010; Abellán et al., 2014).

Obwohl es einige meist auch automatische Algorithmen für die Filterung der Punktdaten gibt, ist dieser Vorgang dennoch mit Schwierigkeiten behaftet. Vor allem in bewaldeten Berggebieten mit tiefliegenden Sträuchern, Steinen oder Totholz und mit komplexen Geländevariationen ist die Aufteilung der Punktdaten in Boden- und Nichtbodenpunkte eine grosse Herausforderung (Liu, 2008; Sharma et al., 2010; Abellán et al., 2014). Vor allem bei terrestrischen Laserpunktclouds zeigt sich diese Filterung aufgrund der unregelmässigen Verteilung der Daten als kompliziert. Im Vergleich zu Daten von luftgestützten LiDAR Systemen ist dies so, weil erstens die Distanz zwischen den gemessenen Punkten verhältnismässig mit der gemessenen Distanz zunimmt und weil es zweitens schwierig ist, Schatten durch Hindernisse wie Bäume und Büsche zu vermeiden (Panholzer & Prokop, 2013).

Wie Tab. 1 zeigt gibt es viele verschiedene Studien, welche sich mit der Filterung von LiDAR Punktdaten befassen und versuchen diese Schwierigkeiten zu verringern. Einen kurzen Überblick über die Filterthematik gibt zudem (Sithole & Vosselman, 2004). Viele der sich immer weiterentwickelnden Algorithmen wurden jedoch primär für die Anwendung auf luftgestützte LiDAR Daten entwickelt. Nur sehr wenige Filter eignen sich vollumfänglich für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten. Es besteht folglich eine klare Notwendigkeit für neue Ansätze und funktionale Methoden für die Filterung von terrestrischen LiDAR Daten (Sharma et al., 2010). Panholzer & Prokop (2013) präsentieren beispielsweise eine neue Methode für die Filterung von terrestrischen Laserdaten. Die Methode basiert dabei auf der direkten Sichtlinie zwischen dem Scanner und den gemessenen Punkten, wobei angenommen wird, dass kein anderer Bodenpunkt oberhalb dieser Verbindungslinie liegen kann. Der vorgeschlagene methodische Ansatz wurde jedoch noch nicht in andere Filtermethoden implementiert, stellt aber eine klare Basis für einen kompletten neuen Filteralgorithmus dar.

Author/Autoren	Filter	LiDAR
Axelsson (2000)	Progressive TIN densification	ALS
Barneveld et al. (2013)	Custom cloud import algorithm	TLS
Briese et al. (2002)	Hierarchical robus interpolation	ALS
Coveney & Fotheringham (2011)	Grid based elevation filter	TLS
Elmqvist (2002)	Active contours	ALS
Guarnieri et al. (2012)	Custom morphological filter	TLS
Kilian et al. (1996)	Morphological filter	ALS
Kraus & Pfeifer (1998)	Interpolation-based filter	ALS
Panholer & Prokop (2013)	Wedge filter	TLS
Pirotti et al. (2013)	Custom progressive morphological filter	TLS
Sharma et al. (2010)	Muti-step process with GIS tools	TLS
Sithole & Vosselman (2005)	Segmentation of the point cloud	ALS
Vosselman (2000)	Slope-based filter	ALS
Zhang et al. (2003)	Progressiv morphological filter	ALS

Tab. 1: Exemplarische Übersicht von in der Literatur verwendeter Algorithmen für die Anwendung auf luftgestützte (ALS) und terrestrische (TLS) LiDAR Daten im bewaldeten Gebiet.

Terrestrische Laserscanner weisen aufgrund der sich ständig entwickelnden Technologien und Verbesserungen der Messfrequenzen sowie der maximalen Reichweite ein grosses Potential für die Gewinnung von hochaufgelösten und genauen Daten für die Analyse und Modellierung von verschiedensten Objekten und Prozessen auf. Dabei führen die Verfeinerungen der Messkapazitäten auch zu wachsenden Datenvolumen und somit zunehmenden Anforderungen an die verarbeitenden Softwares und die Computerleistungen (Puttonen et al., 2013). Zudem besteht vor allem für spezifische Anwendung von terrestrischen Laser Scanning Systemen in dicht bewaldeten Gebieten sowie Gebieten mit ausgeprägter Geomorphologie die Notwendigkeit, bestehende Datenbearbeitungsmethoden zu verfeinern (Dassot et al., 2011) und neue spezifische Methoden zu entwickeln. Damit einhergehend ist es wichtig, dass das vorhandene Wissen über das Verhalten von terrestrischen LiDAR Daten von den Rohdaten bis hin zum jeweiligen Verwendungszweck eingehend analysiert wird und so Schwierigkeiten erkannt werden können.

1.2.2 Digitale Bodenkartierung

Die digitale Bodenkartierung (*Digital Soil Mapping*) (McBratney et al., 2003) taucht in der jüngsten Literatur auch unter den Begriffen *Predictive Soil Mapping* (Scull et al., 2003) und *Digital Soil Modeling and Mapping* (Grunwald, 2005) auf. Um Informationen über die räumlichen Muster sowie Prozesse von Böden über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen hinweg zu gewinnen, verknüpft die digitale Bodenkartierungen Feld- und Labormethoden für die Beobachtungen und Messungen mit quantitativen und räumlichen Vorhersagemethoden (McBratney et al., 2003). Nach Grunwald (2005) handelt es sich dabei auch um die computer-unterstützte Herstellung digitaler Bodenkarten zur Beschreibung von Bodeneigenschaften und -typen. Dabei liegt der Fokus auf der Erstellung und Verbreitung der digitalen, räumlichen Informationen (Grunwald, 2005; Minasny et al., 2013). Für die Generierung dieser Bodenkarten, die Datenerhebung sowie die vorhersagende Modellierung existieren im Kontext der digitalen Bodenkartierung verschiedene methodische Ansätze (McBratney et al., 2003). Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methoden werden im Kapitel 3 detailliert vorgestellt und beschrieben.

In der Schweiz verwendeten bisher einige wenige Studien (Mosimann & Herbst, 2013; Nussbaum, 2011) Methoden der digitalen Bodenkartierung für die Generierung von hochaufgelösten, digitalen Bodenkarten. Diese statistischen Methoden werden zusammen mit Umweltfaktoren verwendet, um Boden-Umweltbeziehungen zu beschreiben sowie Bodeneigenschaften und -typen vorherzusagen. Sogenannte Boden-Landschaftsmodelle bilden dabei den konzeptionellen

Rahmen für die Beziehung zwischen den Umweltfaktoren und den Bodeneigenschaften (McBratney et al., 2003). Diese Modelle basieren meist auf dem SCORPT-Ansatz von Jenny (1941), der sich aus den fünf bodenbildenden Umweltfaktoren zusammensetzt

$$S = f(c, o, r, p, t), \quad (1)$$

wobei S = Boden, c = Klima, o = Organismen, r = Topographie, p = Geologie und t = Zeit. Die Beziehung zwischen den Bodeneigenschaften und den Umweltfaktoren hängt dabei stark von der geographischen Region, den verwendeten Methoden und den räumlichen sowie zeitlichen Skalen ab (Malone et al., 2013). Seit der Beschreibung dieses Ansatzes wurden zahlreiche quantitativ vorhersagende Modelle für die Bodenbildung basierend auf der Topographie ($S = f(r)$) mit zunehmender Komplexität der Vorhersagemethoden (f) und der topographischen Attribute (r) verwendet (Bishop et al., 2006). Dabei führte erst die erhöhte Verfügbarkeit von digitalen Höhendaten und die einhergehende Popularität von geographischen Informationssystemen (GIS) sowie die verbesserten Algorithmen für die Berechnung der topographischen Attribute zu GIS-basierten Studien, welche die digitalen topographischen Attribute mit Bodenbeobachtungen verbanden und somit zum Begriff der digitalen Boden-Gelände Modellierung führten (Bishop et al., 2006). McBratney et al. (2003) bildeten basierend auf dem Ansatz von Jenny (1941) den mit zwei zusätzlichen Umweltfaktoren ergänzten SCORPAN-Ansatz:

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n), \quad (2)$$

wobei S = Boden, s = zusätzliche Bodeneigenschaft, c = Klima, o = Organismen, r = Topographie, p = Geologie, a = Zeit und n = Raum. Verschiedene Studien belegen, dass vor allem die Topographie ein wichtiger Umweltfaktor für die vorhersagende Modellierung von Bodeneigenschaften ist (McBratney et al., 2003; Grunwald, 2005; Behrens et al., 2010).

Die topographischen Gegebenheiten sind meist auf bestimmten räumlichen Skalen ausgeprägt. Deshalb sind vorhersagende Modelle, welche den Umweltfaktor Topographie verwenden nur dann von höchster Genauigkeit, wenn der optimale Skalenbereich dieser topographischen Attribute (wie beispielsweise die Hangneigung oder die Krümmung) verwendet wird (Muñoz & Kravchenko, 2012). Der Skalenbereich ist also von grundlegender Wichtigkeit, wenn digitale Bodenkarten generiert werden (Behrens et al., 2010). Atkinson & Tate (2000) beschreiben die Skala beziehungsweise die Wahl des optimalen Skalenbereichs für eine Bodenmodellierung als einer der limitierenden Faktoren in der digitalen Bodenkartierung. Die Umwelt kann weder in ihrer ganzen Komplexität noch in allen einzelnen Details untersucht, modelliert und visualisiert werden. Aus diesem Grund ist die Skala wichtig, wenn es darum geht den Fokus auf ein bestimmtes Gebiet oder einen bestimmten Prozess zu legen, eine Auswahl zu treffen und unter anderem auch Informationen zu verallgemeinern. Die Skala ist folglich ein hoch kompliziertes Konzept (Cavazzi et al., 2013). In der digitalen Bodenkartierung ist die geeignetste Auflösung eines digitalen Geländemodelles demnach in erster Linie abhängig von der Skala des der Untersuchung zugrundeliegenden Prozesses. Diese Prozesse, welche die Bodenbildung und -entwicklung beeinflussen sind wiederum von der umliegenden Landschaft abhängig (Cavazzi et al., 2013). Dies bedeutet, dass beispielsweise eine Bodeneigenschaft nur dann am besten vorhergesagt werden kann wenn verschiedene, beispielsweise topographische Attribute auf den jeweiligen Skalen miteinander kombiniert werden (Behrens et al., 2010). Die Wahl der Skala gibt dann sowohl die Analyse teilweise vor und formt auch das Resultat der digitalen Bodenkartierung. Ein besseres Verständnis sowie quantitatives Wissen über die Skalenthematik sowie räumliche Skalenkonzepte (Malone et al., 2013) könnte folglich zu besseren Bodenvorhersagen führen (Cavazzi et al., 2013). Um die geeignetste Auflösung eines digitalen Geländemodelles für die digitale Bodenkartierung zu finden, kann beispielsweise die Güte der Modellierungen mit unterschiedlichen Auflösungen verglichen werden (Dobos & Hengl, 2009).

Einhergehend mit dieser Skalendiskussion hat die zunehmende Verfügbarkeit von digitalen georäumlichen Informationen sowie von digitalen Höhenmodellen (Bishop et al., 2006) einen grossen Einfluss auf die digitale Bodenkartierung. Die Verwendung von neuen Tools und Techniken (beispielsweise für die Datenerhebung) und von daraus resultierenden hochqualitativen digitalen Geländemodellen führen zu einer Verbesserung der Bodenvorhersage (Boettinger et al., 2010), vereinfachen die Gewinnung von Bodeninformationen auf regionaler und lokaler Stufe und ermöglichen eine zunehmend umfassendere Analyse und Visualisierung von Bodeneigenschaften und -typen in ihrem Kontext (Grunwald, 2005). Aus diesem Grund befasst sich die digitale Bodenkartierung weitgehend mit der Generierung von digitalen Geländemodellen und den damit verbundenen Herausforderungen, denn die Beschreibung der Landschaft durch verschiedene abgeleitete Attribute ist essentiell, wenn es um die Vorhersage von Verteilungen von verschiedenen Bodeneigenschaften geht. Hochaufgelöste digitale Geländemodelle sind als wertvolle sekundäre Informationsquelle von grösster Wichtigkeit. Analog zum digitalen Höhenmodell repräsentiert das digitale Geländemodell die räumliche Verteilung von topographischen Attributen über die Landschaft. Für die Modellierung von Bodeneigenschaften werden dann sowohl primäre als auch sekundäre Attribute verwendet (Bishop et al., 2006). Die Datenquellen und Methoden für die digitale Geländemodellierung haben sich in den letzten Jahren stark verändert (Wilson, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus dabei vor allem auf der Verwendung von terrestrischen LiDAR Daten als primäre Datenquelle. Bis anhin ist wenig über die Eignung von terrestrischen Laserdaten für Boden-Landschaftsmodelle bekannt (Barneveld et al., 2013; Prentice, 2014). Deshalb stellt sich unter anderem die Frage in wie weit diese hochaufgelösten und hochqualitativen Daten die Methoden der digitalen Bodenkartierung unterstützend beeinflussen und verbessern können.

Die digitale Bodenkartierung setzt sich folglich aus verschiedenen aktuellen Forschungsbereichen zusammen. Grundlegend sind neben den eigentlichen meist statistischen Methoden zur Modellierung von spezifischen Bodeneigenschaften vor allem die Datengrundlagen. Terrestrische Laserdaten ermöglichen die Generierung von qualitativen, hochaufgelösten digitalen Geländemodellen, die wiederum eine wertvolle Basis für die Bodenmodellierungen bilden. Von umfassender Wichtigkeit ist zudem die vielseitige Skalendiskussion, die sowohl im Bereich der terrestrischen Lasertechnologie als auch im Kontext der digitalen Bodenkartierung zu aktuellen und bedeutenden Fragen führt. In diesem Zusammenhang stellt sich beispielsweise auch die Frage, ob diese hochaufgelösten digitalen Geländemodelle die beste Wahl für die digitale Bodenkartierung sind und ob sie zu einer Verbesserung der Modellierung führen (Cavazzi et al., 2013).

Für ein wachsendes Verständnis über die Muster und Prozesse von Böden schafft die digitale Bodenkartierung basierend auf verschiedenen methodischen Ansätzen und Datenquellen und unter ständiger Entwicklung und Verbesserung eine umfassende Datenbasis über verschiedene Bodeninformationen (McBratney et al., 2003).

1.3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im hinteren Alptal bei Brunni (SZ) auf einer Höhenlage zwischen 1149-1170 m. ü. M. an einem bewaldeten Nordhang. Bei der untersuchten Fläche handelt es sich um eine LWF Fläche (langfristige Waldökosystem Forschung), die seit dem Jahre 1995 erforscht wird (WSL, 2013b). Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die Fläche von 0.6 ha auf ca. 1 ha erweitert.

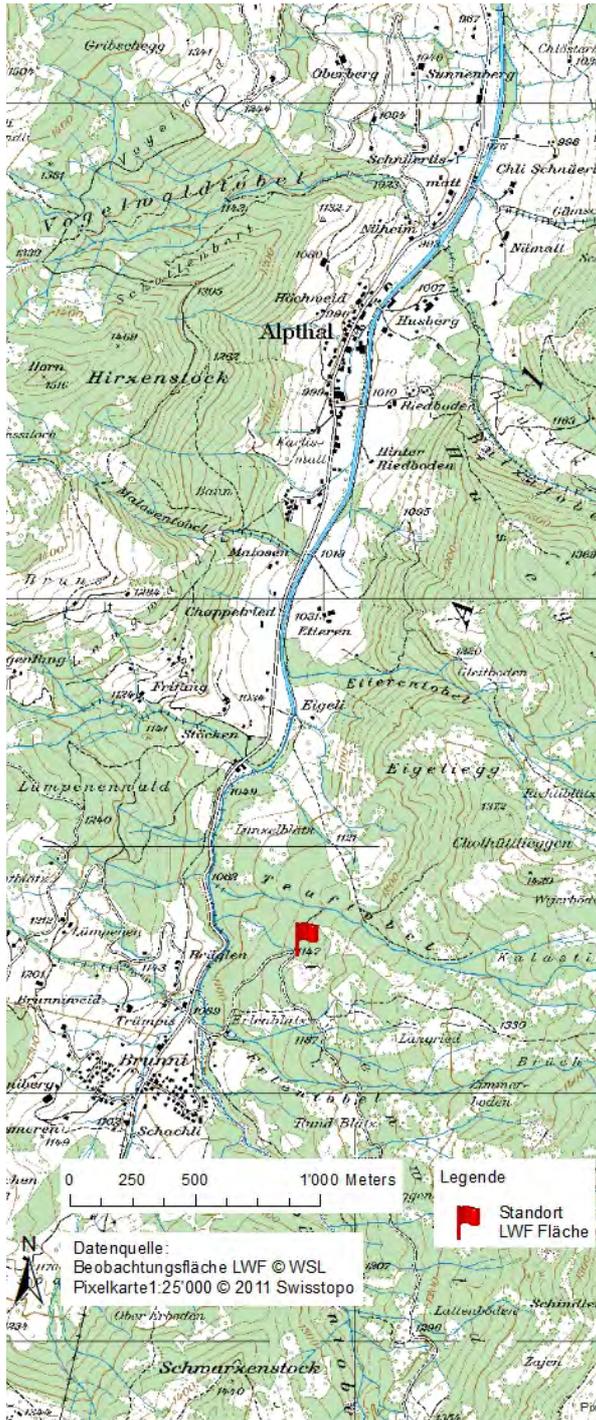


Abb. 1: Standort der LWF-Fläche im Alptal.



Abb. 2: Ausschnitt Karte LWF-Flächen Schweiz (WSL, 2013b).



Abb. 3: LWF-Fläche Alptal.

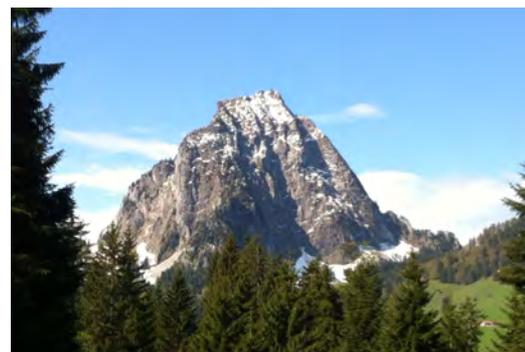


Abb. 4: Grosser Mythen.

Das Klima (Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) ist auf dieser kleinen Untersuchungsfläche sehr homogen (mündliche Mitteilung). Die verhältnismässig hohe durchschnittliche Jahresniederschlagssumme (ca. 2000mm pro Jahr) (MeteoSchweiz, 2013) beeinflusst das gesamte Gebiet stark und führt zu feucht-nassen Bedingungen auf der Untersuchungsfläche, die vor allem durch das ausgeprägte Relief verstärkt werden.

Die lokale Geologie setzt sich aus Nord-Penninikum sowie obere Kreide-unteres Eozän zusammen.

men. Charakteristisch ist der Wägitaler Flysch (WSL, 2013b). Das aus Sedimenten bestehende schiefrige, tonige Gestein ist im Laufe der Alpenfaltung entstanden und ist durch rhythmische Wechsellagerungen der Schichten charakterisiert. Aufgrund dieser schmierigen Flyschschichten und einer durchschnittlichen Hangneigung von ca. 23% (WSL, 2013b) kommt es zu einem instabilen Untergrund und wiederholten Rutschungen. Die Verschiebungen liegen dabei bei maximal 0.2m pro Jahr (mündliche Mitteilung). Bezogen auf die Untersuchungsfläche ist die Geologie demnach sehr homogen, dabei dominieren die Flyschschichten. Aufgrund dieser durch den Flysch und die damit einhergehenden Rutschungen, ausgeprägten Topographie sowie dem hohen Niederschlag, wird der Untergrund meist mit Hangwasser gesättigt. Daher hat das Relief eine grosse Bedeutung für die Entwässerung des Oberbodens und somit auch für die Pedogenese (Bodenentwicklung). Die Geologie ist wichtig, weil sie die Bedeutung des lokalen Mikroreliefs für die Pedogenese erhöht (mündliche Mitteilung).

Charakterisiert wird der Boden einerseits durch die Umlagerungen, welche durch die Rutschungen hervorgerufen werden, andererseits durch die stetige Vernässung. In den Muldenlagen zeigen sich die Böden daher mit ausgeprägten Vernässungsmerkmalen (grau-blaue Verfärbungen mit Rostflecken). Diese Böden entsprechen dem Gley-Typ. Auf den Kuppenlagen findet sich die gegensätzliche Situation. Durch die Auswaschung entwickeln sich dort teilweise sehr stark ausgeprägte Böden vom Typ der Braunerde (braune Verfärbungen) (WSL, 2013b).

Auf der Untersuchungsfläche ist die Vegetation gemäss einzelner Stichproben recht heterogen. Es konnten fünf Vegetationstypen (beispielsweise grasig, Säurezeiger, krautig) klassiert werden (mündliche Mitteilung). Es handelt sich um eine Pflanzengesellschaft vom Standorttyp Schachtelhalm-Tannen-Fichtenwald mit der Fichte als Hauptbaumart (WSL, 2013b). Aufgrund des vernässten und instabilen Untergrundes wurzeln die Nadelbäume nur flach (Frehner et al., 2005), man entdeckt deshalb auch entwurzelte Bäume und spezielle Wuchsformen und -richtungen. Auch in der lokalen Vegetation lassen sich die Spuren dieser speziellen Bedingungen erkennen. Aufgrund des ausgeprägten Mikroreliefs findet man starke Unterschiede zwischen der Vegetation auf den Kuppen (eher trockene und saure Standorte) und den Mulden (sehr vernässte, eher basische Standorte) (Frehner et al., 2005). Die meist nadelwaldfeindlichen Muldenlagen zeigen sich bezüglich der Vegetationsarten sehr artenreich mit Sumpfdotterblumen und Waldschachtelhalm. Auf den Kuppen dominieren Heidelbeeren und säurezeigende Moose und Sauerklee. Dazwischen findet man verschiedene Farnarten sowie Waldmeister und Einbeeren (Frehner et al., 2005). Die Bedeutung der Bodenacidität in diesem Gebiet wird in Kapitel 3.1.1 umfassend beschrieben.

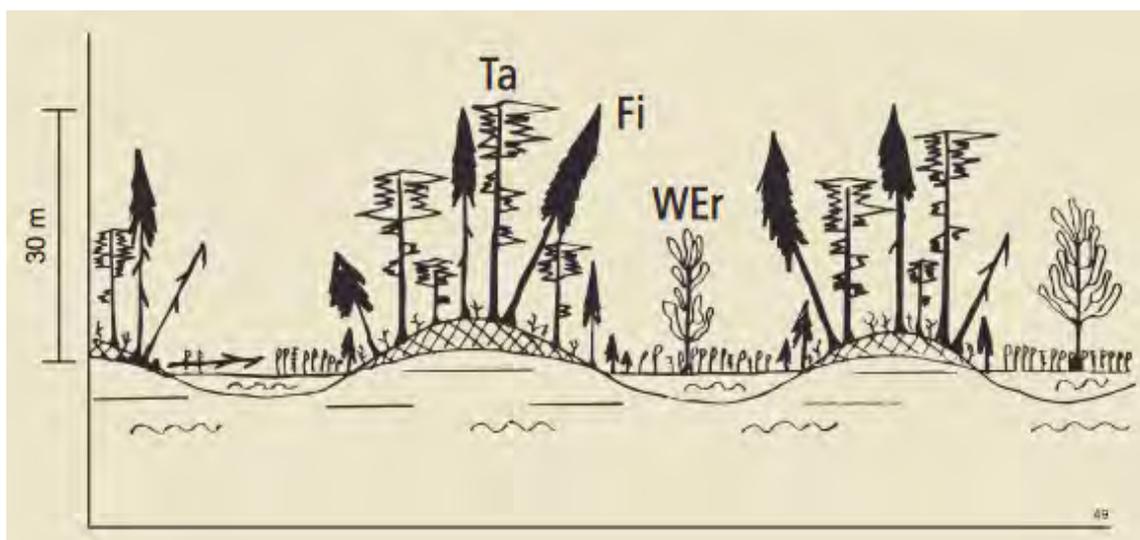


Abb. 5: Idealisiertes Bestandsprofil (Tanne, Fichte, Schachtelhalm) mit den für das Untersuchungsgebiet typischen Kuppen- und Muldenlagen (Frehner et al., 2005).



Abb. 6: Vegetations- und Topographiebild im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes.

Dieses Untersuchungsgebiet repräsentiert aufgrund des speziellen Mikroreliefs ein ideales und umfassendes Gebiet zur Kartierung von Bodeneigenschaften für die Beurteilung von Bodenfunktionen auf regionaler Skala. Aufgrund der langjährigen Untersuchungsperiode auf der LWF Fläche und das dadurch vorhandene Basiswissen sowie zusätzlichen Informationen und Daten ist das Alptal ein wertvolles Untersuchungsgebiet mit viel Potential für weitere Forschungen und neue Erkenntnisse.

1.4 Zielsetzung und Fragestellungen

Das Untersuchungsgebiet mit seinen extremen topographischen Gegebenheiten und denn daraus resultierenden spezifischen Boden- und Vegetationsbedingungen ermöglicht als Basis für diese Masterarbeit die folgende Grundhypothese:

Der bodenbildende Faktor Topographie ist die entscheidende Einflussgrösse auf die Bodeneigenschaft pH und führt zu einem gegensätzlichen Einfluss von Kuppen- und Muldenlagen auf die Bodenacidität.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, dieses lokale Phänomen optimal zu beschreiben. Dabei ist die Ableitung der optimalen Auflösung für die Modellierung der Bodenacidität in diesem Gebiet grundlegend. Es soll herausgefunden werden, wie die lokale Topographie die Bodenacidität beeinflusst und auf welchem Skalenbereich sich dieses Phänomen abspielt. Dabei soll die Modellierung nur über die Topographie stattfinden. Alle anderen Umweltfaktoren bleiben konstant, da es sich um ein sehr kleines Untersuchungsgebiet handelt. Das Klima und die Geologie sind auf der Untersuchungsfläche sehr homogen. Die Vegetation ist an einigen Stellen heterogen, wird jedoch aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung von Boden und Pflanzen in der Datenanalyse nicht berücksichtigt. Die Zeit, welche an den einzelnen Stichproben für die Bodenentwicklung verfügbar war, ist nicht bekannt und kann somit nicht in die Analyse mit einbezogen werden.

Dieses Ziel kann in zwei Teilziele eingeteilt werden, wobei das erste Teilziel die Grundlage für den zweiten Teil der Arbeit und somit das zweite Teilziel bildet. Das erste Teilziel befasst sich mit den neu gewonnenen terrestrischen LiDAR Daten, mit denen ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell generiert werden soll. Das zweite Teilziel umfasst die Vorbereitung beziehungsweise Ableitung verschiedener Attribute, welche nachher die Grundlage für die Modellie-

nung der Bodenacidität mit statistischen Methoden darstellen. Ziel ist dabei eine möglichst genaue Vorhersage der Bodenacidität für den Oberboden im Untersuchungsgebiet.

Aus diesem übergeordneten Rahmen lassen sich folgende drei Forschungsfragen ableiten:

- a) *Welche methodischen Ansätze eignen sich für die Bearbeitung der terrestrischen LiDAR Daten für das steile und dicht bewaldete Untersuchungsgebiet?*
- b) *Welches ist der optimale Skalenbereich und die damit zusammenhängende optimale Auflösung um die Beziehung zwischen der Bodenacidität und der Topographie modellieren zu können?*
- c) *In wie weit ergibt sich aus der Verwendung von terrestrischen LiDAR Daten ein Mehrwert für die Modellierung von Bodeneigenschaften im kleinräumlichen Kontext?*

Die erste Fragestellung bezieht sich auf die Generierung der digitalen Geländemodelle mit den terrestrischen LiDAR Daten, während die beiden anderen Fragestellungen eher im zweiten Teil der Arbeit eingebettet sind.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die gesamte Arbeit kann in zwei eigentliche Hauptteile unterteilt werden. Der erste Teil umfasst die Generierung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells, welches anschliessend die Grundlage für den zweiten Hauptteil, die Ableitung der topographischen Attribute und die anschliessende Modellierung der Bodenacidität bildet. Abb. 7 zeigt eine vereinfachte, schematische Darstellung dieser Arbeitsschritte.

Im folgenden Kapitel 2 und 3 werden die Daten und Methoden für jeweils den ersten Teil sowie den zweiten Teil der Arbeit vorgestellt und detailliert beschrieben. Dabei werden vor allem die Vorgehensweisen für der Datenaufbereitung (terrestrische LiDAR Daten) sowie für die statistische Modellierung hervorgehoben. Ein Fokus soll auch auf den damit einhergehenden Schwierigkeiten und Herausforderungen liegen. In Kapitel 4 werden die Resultate zusammengefasst dargestellt und anschliessend in Kapitel 5 diskutiert. Dabei soll der Schwerpunkt vor allem auf die umfassende Skalendiskussion zu liegen kommen. Desweiteren werden die Resultate den Forschungsfragen gegenübergestellt. Kapitel 6 beinhaltet eine umfassende Schlussfolgerung mit einem interdisziplinären Ausblick. Dabei sollen vor allem die Möglichkeiten und Herausforderungen für die zukünftige Verwendung von terrestrischen LiDAR Daten für die Modellierung von Boden-Landschafts-Modellen hervorgehoben werden.

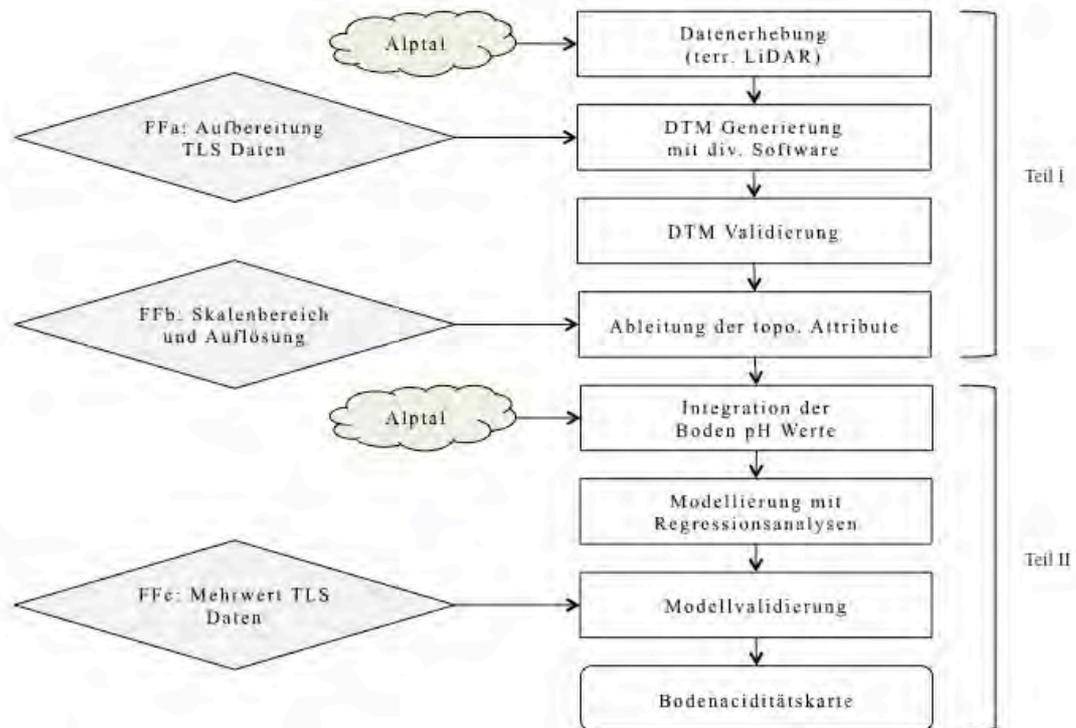


Abb. 7: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte.

2 Methodik Teil I – Generierung der digitalen Geländemodelle

In diesem Kapitel wird die verwendete Methodik für den ersten Teil der Arbeit, die Generierung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells mit terrestrischen LiDAR Daten detailliert beschrieben.

2.1 Verwendete Software

Für die Bearbeitung, Analyse sowie Modellierung und Visualisierung der terrestrischen Punktwolken wurden in dieser Arbeit zwei Softwares: LasTools 1.3 und FUSION 3.42 verwendet. Diese beiden Softwares werden im Folgenden kurz vorgestellt und die angewendeten Tools aufgelistet. Vorgängig wurde die geräteeigene Verarbeitungssoftware des Laserscanners FARO Scene (FARO, 2013b) für die Registrierung und Georeferenzierung der Scans verwendet. Die ArcGIS 10.1 Software der Firma ESRI (ESRI, 2013) wurde durch die gesamte Arbeit hindurch für die räumliche Analyse und vor allem für die Visualisierung der Daten verwendet. Für die visuelle Analyse der Punktdaten wurde zudem die Software FugroViewer (FugroViewer, 2013) verwendet. Diese Software erlaubt die Betrachtung und Analyse sowie die Kommunikation von LiDAR Daten. An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter auf diese beiden letzteren Softwares eingegangen.

2.1.1 LasTools

Terrestrische Laserdaten müssen aufgrund ihres teilweise sehr hohen Datenvolumens in einem effizienten Format abgespeichert werden. Eines der populärsten Formate für die Abspeicherung von Laserpunktdaten ist das LAS Format (ASPRS, 2011). Beim LAS Format handelt es sich um ein standardisiertes binäres Format für die Abspeicherung von LiDAR Daten und die Verwendung im Rahmen der LiDAR Datenbearbeitung (Mongus & Žalik, 2012; Isenburg, 2013). Dieses Format ermöglicht im Gegensatz zum regulären ASCII Format eine effizientere Abspeicherung sowie Sichtung und Interpretation der Daten. Wichtig ist, dass beim LAS Format alle spezifischen LiDAR Informationen zusätzlich abgespeichert werden können und nicht verloren gehen (ASPRS, 2011).

Für die Bearbeitung der im LAS Format abgespeicherten terrestrischen LiDAR Daten wurden in dieser Arbeit in erster Linie die LasTools (Rapidlasso, 2013) verwendet. Sie ermöglichen die Analyse und Bearbeitung von LiDAR Daten von den Rohdaten bis zum fertigen digitalen Höhenmodell und beinhalten verschiedene Verarbeitungsmöglichkeiten wie beispielsweise die Klassifikation (lasground.exe) oder die Modellgenerierung (lasgrid.exe) und stellen auch Elemente für das Daten- und Projektmanagement wie beispielsweise Visualisierungen oder Qualitätskontrollen zur Verfügung (Hug et al., 2004). Die LasTools wurden jüngst in verschiedenen Studien für die Bearbeitung von LiDAR Daten verwendet (Gerke & Xiao, 2014). Sie eignen sich aufgrund ihrer Vielseitigkeit und ihrer meist relativ einfachen Implementierung und Anwendung für die Bearbeitung von LiDAR Daten. Primär wurden sie jedoch für luftgestützte LiDAR Daten entwickelt. Erste Parameter für terrestrische LiDAR Daten sind in der Entwicklungsphase und teilweise schon verwendbar (bsp. '-not_airborne' Parameter). Herausforderungen treten bei der Verwendung der LasTools vor allem bei der Festlegung der Parameterwerte für das spezifische Untersuchungsgebiet auf. Eine exemplarische Übersicht der angewendeten Tools ist in der folgenden Tab. 2 gegeben.

Tool	Zweck	Parameter	Default	Kommentar
txt2las.exe	Umformatierung.	-set_scale	-	0.001 0.001 0.001 (Genauigkeit X, Y, Z in m).
lastile.exe	Kachelt Punkte von einem/mehreren Files in nicht-überlappende Quadrate einer definierten Grösse.	-tile_size n -merged	1000 -	- Fügt alle Daten vor der Kachelung zusammen.
lasthin.exe	Ausdünnen der Daten: Ein uniformes Gitter wird über die Punkte gelegt, dann wird von jeder Zelle nur der definierte Wert behalten.	-lowest -highest -random -step n	lowest 1	Es werden nur die tiefsten Z-Werte in der Zelle behalten. Rastereinheit.
lasground.exe	Klassifikation der Punkte in Boden- und Nichtbodenpunkte.	-step n -fine -extra_fine -wilderness -not_airborne	1 - - -	Default ist gut für Wald- und Berggebiete. Intensiviert die Suche nach den initialen Bodenpunkten: Je steiler das Gelände, desto feiner muss die Bodenabschätzung sein. Für terrestrische und mobile LiDAR Daten.
lasgrid.exe	Rasterung der Daten: div. Output-Formate (ASC, IMG, TIF, PNG etc.).	-fill n -step n	- 1	Füllt Leerräume (voids) im Gitter mit einem quadratischem Suchradius (n). Spezifiziert den n x n Bereich für die Rasterung.

Tab. 2: Übersicht über eine Auswahl der wichtigsten LasTools und ihrer Parameter (Rapidlasso, 2013).

2.1.2 Fusion

Damit ein möglichst genaues und hochaufgelöstes digitales Geländemodell erstellt werden konnte, wurde in einer zweiten Phase eine zusätzliche Software für die Bearbeitung der Punktdaten verwendet. Bei dieser Software handelt es sich um FUSION/LDV (FUSION/LDV, 2013). Die beiden Visualisierungsprogramme FUSION und LDV (LiDAR data Viewer) ermöglichen eine schnelle und einfache Auswahl sowie Darstellung von grossen LiDAR Datensätzen und stellen Tools für die Bearbeitung wie beispielsweise die Klassifikation der Punktdaten und die Generierung der Geländemodelle bereit (McGaughey, 2013). Die Software eignet sich primär für die Bearbeitung von luftgestützten LiDAR Daten und wurde speziell für bewaldete Gebiete entwickelt. Aufgrund der benutzerfreundlichen Eigenschaften sowie der klaren Struktur und der kostenlosen Verfügbarkeit, ermöglicht FUSION/LDV einen einfachen Einstieg und eignet sich deshalb sehr gut als Vergleichssoftware für die Generierung eines digitalen Geländemodells. Erste Resultate können schnell erzielt werden. Mit möglichen Schwierigkeiten ist die Auswahl und Festlegen der Parameter beziehungsweise Parameterwerte verbunden. Die Vorgabewerte (Default) der einzelnen Parameter eignen sich jedoch in den meisten Fällen für eine erste Sichtung der Daten. Die FUSION Tools kamen im Rahmen dieser Arbeit bei den Datenbearbeitungsschritten der Filterung sowie der Modellgenerierung zum Einsatz. Alle vorgängigen Auf-

bereitungsschritte wurden mit der geräteeigenen Software FARO Scene oder mit den LasTools verrichtet. Die Tab. 3 beschreibt die beiden wichtigsten FUSION Tools mit ausgewählten Parametern, welche auch in dieser Arbeit verwendet wurden. Das Tool GroundFilter filtert die Punktdaten, um die Bodenpunkte zu identifizieren. Die meisten der Nichtbodenpunkte (Vegetation) werden durch geeignete Werte der Gewichtsfunktion entfernt. Die Vorgabewerte liefern gute Resultate für sehr dichte Punktwolken. GridSurfaceCreate generiert das Oberflächenmodell. Dabei werden individuelle Höhenwerte der Zellen mit dem Durchschnittswert aller Punkte in der Zelle berechnet und im DTM-Format abgespeichert.

Tool	Zweck	Parameter	Default	Kommentar
GroundFilter	Filterung der Punktdaten.	- gparam	-2.0	Wert für den g Parameter der Gewichtsfunktion.
		- wparam	2.5	Wert für den w Parameter der Gewichtsfunktion.
		- tolerance	Werte der Gewichtsfunktion	Nur Punkte innerhalb der Toleranz werden in das Output File integriert.
		- iterations	5	Anzahl Wiederholungen für die Filterung.
GridSurfaceCreate	Generierung Oberflächenmodell.	- cellsize	-	Rastergrösse.
		- xyunits	M (Meter) F (Fuss)	Einheit für die X-, Y- und Z-Koordinaten.
		- zunits		Einheit für die Z-Koordinaten.
		- coordsys	0 (unbekannt) 1 (UTM) 2 (state plane)	Koordinatensystem
		- zone	0 (unbekannt)	Koordinatensystem Zone
		- horizdatum	...	- Horizontaldatum
		- vertdatum		- Vertikaldatum

Tab. 3: Übersicht der beiden verwendeten Tools mit einer Auswahl der wichtigsten Parameter der FUSION Software (FUSION/LDV, 2013; McGaughey, 2013).

2.2 Datengrundlage

2.2.1 FARO Focus 3D 120

Die Auswahl eines terrestrischen Laserscanners erfolgt nach dem für eine Vermessung benötigten Leistungsbedarf, wobei die Reichweite, der Sichtbereich, die räumliche Auflösung, die Erfassungsgeschwindigkeit, die Kombinationsmöglichkeit mit anderen Geräten wie beispielsweise Farbkamera oder GPS sowie die Genauigkeit (Distanz- und Objektgenauigkeit) des Scanners ausschlaggebend sind (Schulz & Zogg, 2006; Fröhlich & Mettenleiter, 2004; Dassot et al., 2011). Aufgrund der Verschiedenartigkeit und Vielseitigkeit der Geräte ist es schwierig, die verfügbaren terrestrischen LiDAR Systeme zu vergleichen. Neben den technischen Spezifikationen sind zudem die verfügbaren Softwares für die Aufbereitung und Modellierung der Punktwolke wichtig (Schulz & Zogg, 2006). Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Erfassung der Punktdaten der terrestrische Laserscanner FARO Focus 3D 120 (FARO, 2013a) verwendet. Die technischen Spezifikationen dieses Gerätes sind in der folgenden Tab. 4 aufgeführt.

FARO Focus 3D 120	
Verfügbarkeit	kommerziell
Einführungsdatum	2010
Distanzmessung	Phasenvergleich
Rücksendetyp	905 mm (Nahinfrarot), Einzelsignal
Messbereich	0.6-153m
Messgeschwindigkeit	bis zu 976'000 Punkte pro Sekunde
Bereichsgenauigkeit	2mm (auf 25m)
Punktgrösse beim Austritt	3.8mm
Zusätzliches	integrierte Farbkamera für 3D Farbscans mit einer Auflösung bis zu 70 Megapixeln und parallaxenfreiem Farbüberlagerung

Tab. 4: Technische Spezifikationen des verwendeten terrestrischen Laserscanners FARO Focus 3D 120 (FARO, 2013a; Dassot et al., 2011; Shan & Toth, 2008).



Abb. 8: FARO Focus 3D 120 im Einsatz.

Der Sensor des FARO Focus 3D 120 ermöglicht eine schnelle Datenerfassung von einer terrestrischen Plattform aus. Im Vergleich zu luftgestützten LiDAR System ermöglicht dieser terrestrische Laser eine spezifischere Untersuchung von kleinräumlichen Prozessen und Variationen in komplexen Landschaften. Mit verhältnismässig geringerem Planungs- und Anwendungsaufwand können hochaufgelöste und genaue Daten erhoben werden (Schulz & Zogg, 2006). Dieser Scanner benutzt für die Distanzmessung das Prinzip des Phasenvergleichs. Dabei wird die Distanz durch die Analyse der Phase zwischen dem kontinuierlich ausgesendeten und dem empfangenen Laserstrahl gemessen. Für jeden Punkt wird die Distanz in eine bestimmte Richtung gemessen, wobei immer nur ein Rückstrahl empfangen wird (single return) (Dassot et al., 2011). Danach können die X, Y und Z Koordinaten für jeden dieser Punkte für jede Distanzrichtung berechnet werden (Bornaz & Rinaudo, 2004). Verschiedenen Faktoren wie die Distanz zum Ob-

jekt (Reichweite) aber auch der Auftreffwinkel des Laserstrahls und die Reflexionseigenschaft der Oberfläche beeinflussen die Genauigkeit der Distanzmessung (Schulz & Zogg, 2006).

Neben der schnellen Gewinnung von sehr hohen Punktmengen eignet sich dieser Scanner aufgrund der zusätzlich guten Ergonomie (reduziertes Gewicht und Grösse sowie einer integrierten Kamera) sehr gut für hoch präzise und detaillierte Messungen von Objekten in einer geringen Entfernung (Dassot et al., 2011) wie beispielsweise für kleinräumliche Vermessungen im bewaldeten Gelände.

2.2.2 Terrestrische LiDAR Daten

Der terrestrische Laserscanner wurde an verschiedenen ausgewählten Standorten aufgestellt, um möglichst das gesamte Untersuchungsgebiet mit den speziellen topographischen Gegebenheiten umfassend abzudecken. Mit steigender Anzahl der Scans verlängert sich sowohl die Messzeit, als auch das Datenvolumen. Aus diesem Grund ist die Definierung der Auflösung für die Erhebung der Punktdaten sehr wichtig (Schulz & Zogg, 2006). Die räumliche Auflösung wird dabei vor allem durch die Intervalle der Erhebung und den Laseröffnungswinkel (Lichti et al., 2002). Nach dem Scanvorgang liegen die Daten in einer 3D Punktwolke vor (Dassot et al., 2011). Damit die Punkte rekonstruiert (Dassot et al., 2011) und die verschiedenen Scans im Anschluss miteinander verbunden werden können müssen zusätzlich noch sogenannte Passpunkte (auch Markierungspunkte) festgelegt werden. Passpunkte werden meist durch Kugeln markiert und können auf bereits bestehenden Fixpunkten aufgestellt oder durch Tachymetrie oder GPS neu eingemessen werden (Ruiz et al., 2004). Wichtig ist, dass die Passpunkte im nahen Umfeld des Gerätes aufgestellt werden (Kersten et al., 2012). Wenn mehrere Scans erstellt werden, sollte die Anzahl der in jedem Scan identifizierbaren Passpunkte bei mindestens drei liegen (Sharma et al., 2010).



Abb. 9: Markierungskugel im Feld.

Zur Verbesserung der Datengrundlage wurden ergänzend zu den im Mai 2013 erstellten Scans weitere Datenerfassungen im Juli durchgeführt. Die Scans im Mai wurden dabei mit einer Auflösung von 6mm auf 10m erhoben, dies bedeutet, dass auf eine Distanz von 10m alle 6mm ein Punkt erhoben wurde. Im Juni wurde diese Auflösung auf 3mm auf 10m erhöht um eine höhere

Punktdichte zu erzielen und das charakteristische Gelände besser abzudecken (Schürch et al., 2011). Die Punktdichte nimmt dabei mit zunehmender Distanz weg vom Scanner ab, da es sich um eine sphärische Verteilung der Punkte handelt (Puttonen et al., 2013).

Obwohl die Laserdaten in zwei Phasen erhoben wurden, wurden sie im weiteren Verlauf zusammen bearbeitet. Die unterschiedlichen Auflösungen der beiden Datensätze beeinflussen in erster Linie die Dichte der Punkte im Untersuchungsgebiet. Abb. 10 zeigt die Punktdichte über das Untersuchungsgebiet sowie die Standorte des Laserscanners und lässt erkennen, dass Gebiete mit ausgeprägter Topographie gut abgedeckt wurden. Stellenweise liegt eine lokal höhere Punktdichte vor. Grund dafür ist, dass sich das Scannergerät in Bodennähe befand und die Daten in einem weiten Winkel erfasst wurden (Puttonen et al., 2013).

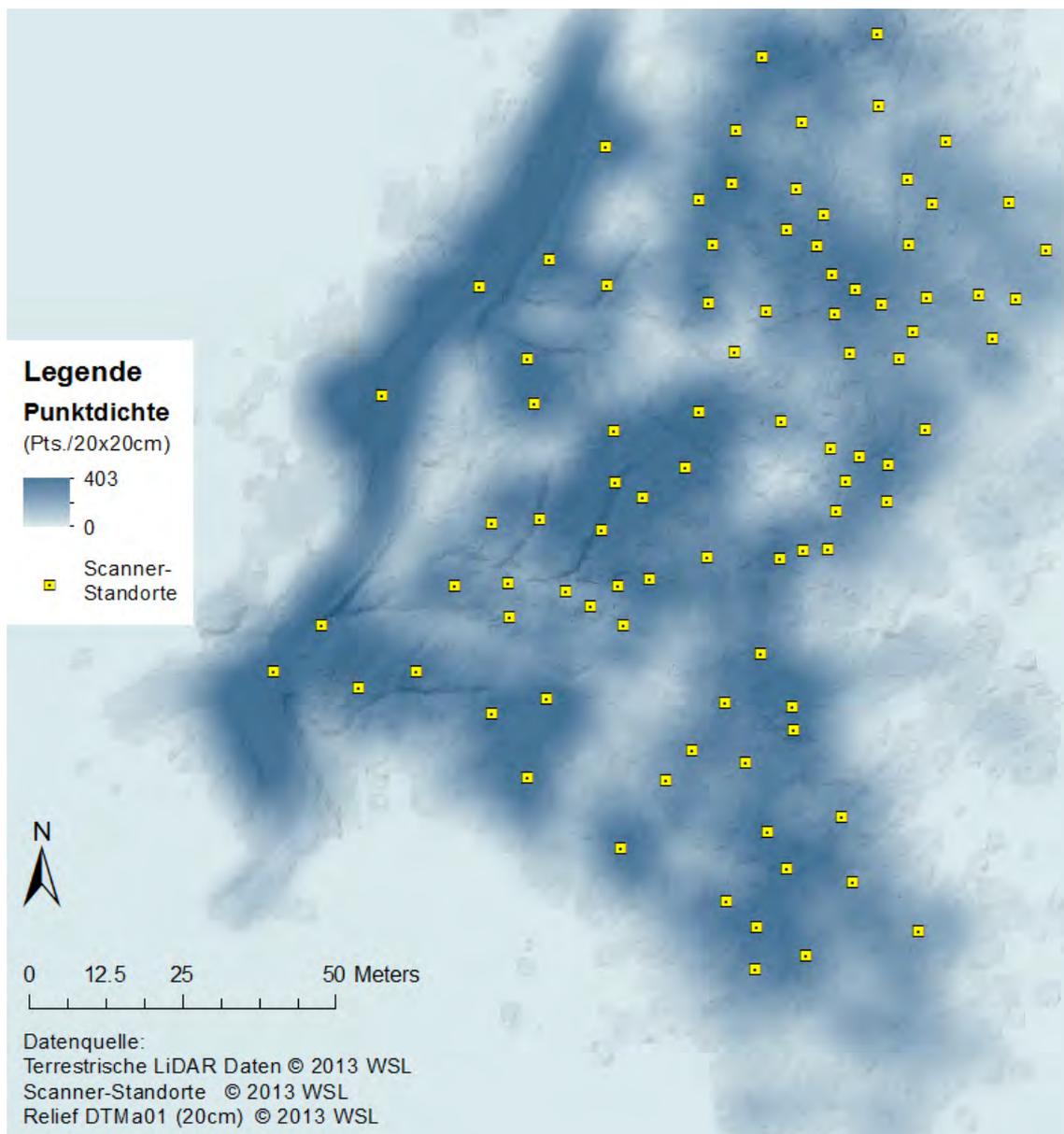


Abb. 10: Dichte der ausgedünnten terrestrischen Laserpunktdaten sowie Standorte des FARO Focus 3D 120 Laserscanners im Feld.

2.2.3 Datenqualität

Bei der weiteren Verarbeitung der Daten ist es wichtig, die Qualität und Genauigkeit der Punktdaten zu beachten. Primär wird die Datenqualität durch die Genauigkeit, die Auflösung, die maximale Reichweite sowie durch den Aufbau und Ablauf der Vermessung beeinflusst (Abellán et al., 2014). Festzuhalten ist zudem, dass während der Datenerfassung unterschiedliche Faktoren zu systematischen Effekten und unter anderem Fehlern in der Distanzmessung führen können. Die vorliegenden Umwelt- und Klimaverhältnisse beeinflussen die Datenerfassung sehr. So haben beispielsweise die Sonneneinstrahlung aber auch nasse Verhältnisse mit Regen oder Schnee eine grosse Bedeutung, da sie den Scanvorgang und die Datengewinnung erschweren und zu hinderlichen Fehlern und Effekten in den Daten führen können (Schulz & Zogg, 2006).

Aufgrund der vorliegenden technischen Spezifikationen des verwendeten Laserscanners sowie den untersuchungsspezifischen Einstellungen und den Umweltbedingungen, kann gesamthaft von einer relativ umfassenden Datengrundlage und hohen Datenqualität ausgegangen werden. Durch die visuelle Analyse der Punktdaten konnte jedoch aufgezeigt werden, dass vereinzelt Gebiete mit tieferen Punktdichten und lückenhaften Datengrundlagen vorliegen. Abb. 11 zeigt diese Gebiete auf. Die Identifikation und Festhaltung solcher Problemzonen ist wichtig für den weiteren Umgang mit den Daten und vereinfacht die spätere Interpretation der Untersuchung. Im Bezug auf die vorliegenden Problemzonen gibt es folgende Erklärungsgründe:

- Vor allem an den Randgebieten der Untersuchungsfläche gibt es tendenziell weniger Punkte. Im Vergleich zu den übrigen Gebieten überlappen sich die einzelnen Scans an den Rändern weniger, wodurch die Punktdichte reduziert wird.
- In Gebieten mit sehr ausgeprägtem Mikrorelief wie beispielsweise in tiefen Rinnen oder an sehr steilen Hanglagen kommt es zu Schattierungen, da der Laserstrahl die Erdoberfläche nicht oder nur schwer erreichen konnte.
- Dies gilt ebenfalls für Gebiete mit sehr dichter Vegetation. Bodennahe und bodenbedeckende Vegetation wie tiefwachsene Sträucher aber auch dichtstehende Bäume erschweren die Datengewinnung.

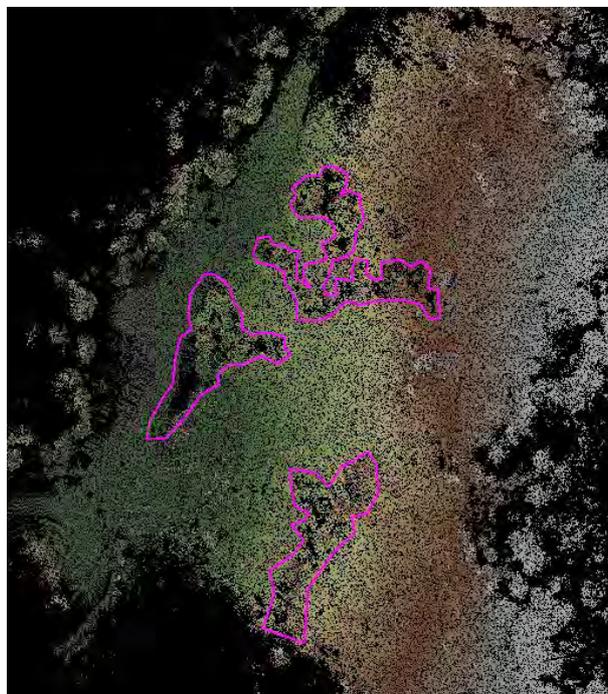


Abb. 11: Punktdaten nach der Ausdünnung klassifiziert nach ihrer Höhe (Z). Die wenigen Gebiete mit mangelnden Daten sind deutlich zu sehen.

2.3 Datenbearbeitung

Die Prozesskette der terrestrischen Laserdaten von den Rohdaten bis hin zum digitalen Geländemodell wird in Abb. 12 schematisch verdeutlicht. Im Folgenden werden die einzelnen Bearbeitungsschritte (Datenaufbereitung, Filterung und Modellgenerierung) im Bezug auf die Verwendung der in Kapitel 2.1 vorgestellten Softwares umfassend beschrieben.

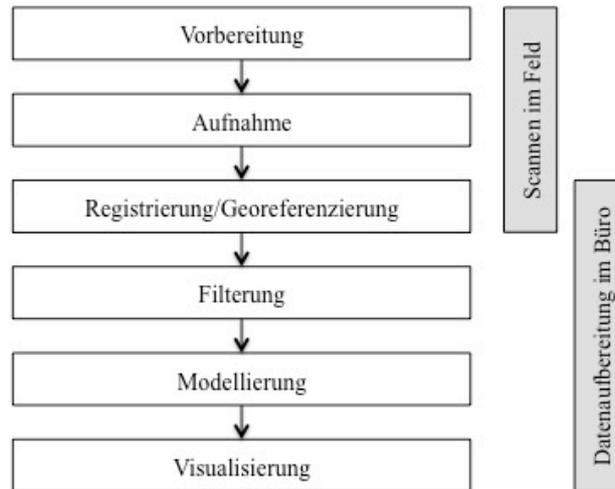


Abb. 12: Prozesskette des terrestrischen Laser Scanning basierend auf Kersten et al. (2012).

2.3.1 Datenaufbereitung

Durch die im Feld gesetzten Passpunkte können die von verschiedenen Standpunkten aufgenommenen Punktwolken im Nachhinein durch den Prozess der Registrierung verknüpft und durch Georeferenzierung in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden (Schulz & Zogg, 2006). Dafür gibt es viele meist geräteeigene Softwares (Dassot et al., 2011) und unterschiedliche Methoden (Abellán et al., 2014). In diesem ersten Schritt wurden also die einzelnen Scans mit der geräteeigenen Software FARO Scene (FARO, 2013b) verknüpft, damit speichert man die Punkte pro Scan ab, um eine zu grosse Datenmenge zu verhindern (Abellán et al., 2014). Die in Textfiles abgespeicherten Daten wurden dann mit dem LasTool txt2las.exe in das LAS-Format umgewandelt. Die LAS Datei ist nach einem bestimmten Schema mit Attributinformationen aufgebaut und beinhaltet für jeden erfassten Laserpuls einen Datensatz. Bei dieser Umwandlung kann die Genauigkeit erneut definiert werden (0.001 0.001 0.001m). In einem nächsten Schritt werden die Punktdaten in Kacheln aufgeteilt, damit sie aufgrund der hohen Datenmenge besser weiterbearbeitet werden können. Mit dem lastile.exe erfolgt dieser Schritt, wobei man die Grösse dieser Kacheln mit dem Parameter '-tile_size' definieren kann. Für die vorliegenden Daten eignen sich aufgrund der topographischen Gegebenheiten Kacheln von 10x10m. Das nächste angewendete Tool lasthin.exe wurde verwendet um die Punktdaten ausdünnen, da die Punktdichte der Daten sehr hoch ist. Das Datenvolumen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Vorgehensweise der Bearbeitungsschritte, weshalb eine Datenreduktion im Sinne einer Ausdünnung eine effiziente Lösung darstellt (Kersten et al., 2012). Mit dem Parameter '-step' kann die Rastereinheit definiert werden. Zusätzlich kann man noch wählen, welche Punkte in der Zelle behalten werden sollen, hier wurde pro Zelle (0.1 m²) immer der Punkt mit dem tiefsten Z-Wert behalten, da der Fokus auf den Punkten liegt, welche die Erdoberfläche repräsentieren.

Die Datenaufbereitung mit den Tools der FUSION Software entspricht dem gleichen Ablauf. Es gibt Tools und Parameter für die Kachelung und Ausdünnung der Laserpunktdaten. Diese Tools

wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet da der Fokus primär auf der Filterung der Laserdaten liegt. Es wurden daher die bereits mit den LasTools aufbereiteten Daten für die Filterung mit dem FUSION Tool GroundFilter verwendet (siehe Kapitel 2.3.2).

2.3.2 Filterung

Um ein hochqualitatives Geländemodell generieren zu können, ist es wichtig, dass alle Vegetationspunkte eliminiert werden und dabei die Bodenpunkte bestehen bleiben (Kraus & Pfeifer, 1998). Das Entfernen der nicht benötigten Laserpunkte für die Generierung eines digitalen Geländemodells wird als Filterung bezeichnet (Axelsson, 2000). Doch gerade in dicht bewaldeten Gebieten ist die Filterung von Laserdaten mit einigen Schwierigkeiten verbunden (Guan et al., 2014). In Sithole & Vosselman (2004) werden verschiedene Filtermethoden aus der Literatur vorgestellt und verglichen. Zudem wird ein vertiefter Einblick in die Charakteristiken von diesen Methoden gegeben, wobei hervorgehoben wird, dass sowohl die Komplexität des zu erfassenden Objektes wie beispielsweise diskontinuierliches Gelände oder Vegetation zu Fehlern des Filteralgorithmus führen können. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig, dass die verwendeten Methoden eingehend analysiert werden, um die für den Verwendungszweck beste Kombination von Parametern zu definieren.

Die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten LasTools, bieten mit `lasground.exe` (für Details siehe Tab. 2) eine umfassende Möglichkeit für die Klassifikation der Punktdaten in Boden- und Nichtbodenpunkte. Das Tool eignet sich für Wald- und Berggebiete und erzielt schon mit dem Default Einstellungen gute Resultate (Kapitel 4.1). Gerade in steilen, dicht bewaldeten Gebieten ist es jedoch schwierig die Erdoberfläche realgetreu abzubilden. Deshalb ist die intensive Suche nach Bodenpunkten im Filterungsprozess von zentraler Bedeutung. Der Algorithmus basiert auf dem methodischen Ansatz der adaptiven TIN (Triangular Irregular Network) Verdichtung (Axelsson, 2000). Dabei werden die Punkte durch die iterative Bildung eines Dreiecksmodells klassifiziert, indem nur diejenigen Punkte zur TIN-Oberfläche hinzugefügt werden, welche gewissen Parametergrenzwerten (Verdichtungs-, Distanz- und Winkelparameter des TIN) genügen. Diese Grenzwerte sind abhängig von den Daten und verändern sich während des Filterprozesses. Zusätzlich zu diesen datenabhängigen Parametern stellt das `lasground.exe` Tool weitere Parameter wie `'-fine'`, `'-ultra_fine'` und `'wilderness'` zur Verfügung die sich speziell für die Filterung in steilen und bewaldeten Gebieten eignen. Dabei wird mit einem immer feiner werdenden Gitter nach den jeweils tiefsten Laserpunkten (Z-Koordinaten) in einer Zelle gesucht. Der Parameter `'-fine'` vervierfacht beispielsweise die Granularität dieses Suchgitters, dessen originale Größe durch `'-step'` angegeben wird. Wie schon in Axelsson (2000) beschrieben, weisen unterschiedliche Gebiete (beispielsweise Wald- oder Stadtgebiete) andere Charakteristiken auf und bedingen somit unterschiedliche Parameterwerte. Sowohl bei der Erhebung der Laserdaten als auch bei der Anwendung des Algorithmus ist deshalb die Wahl der spezifischen Parameter (LasTools) grundlegend.

Für die Filterung der Daten mit der FUSION Software wurde das Tool GroundFilter verwendet (für Details siehe Tab. 3). Der dahinterliegende Filteralgorithmus wurde adaptiert von der robusten Interpolation (Kraus & Pfeifer, 1998) und basiert auf einer linearen Vorhersage (Kraus & Mikhail, 1972). Es handelt sich um einen iterativen Prozess, indem die Oberfläche durch individuelle Gewichte für jeden Punkt berechnet wird (robuste Schätzung) und somit schrittweise eine Annäherung an die wahre Erdoberfläche gemacht werden kann. Die Distanz und Richtung zur Erdoberfläche werden dabei dazu benutzt, um die Gewichte für jeden Laserpunkt mit Hilfe der Gewichtungsfunktion zu berechnen.

Dieser Filteralgorithmus eignet sich besonders für bewaldete Gebiete und erzielt bereits schon mit den Default Einstellungen der Gewichtungparameter gute Resultate bei dichten Punktwolken. Für die Generierung eines optimalen Modells der Erdoberfläche muss mit den verschiedenen Parametern experimentiert werden. Die Festlegung der Parameterwerte ist herausfordernd

und hängt stark mit den Gegebenheiten im vorliegenden Untersuchungsgebiet zusammen. Meist sind kleine Werte für die Gewichtungparameter hilfreich, damit Punkte nahe der Erdoberfläche stärker gewichtet werden. Grosse Gewichtungswerte würden eher zu Ausreißern führen. Ein kleiner Toleranzbereich sowie ein hoher Iterationswert ermöglichen die Suche nach den initialen Bodenpunkten und erlauben eine Annäherung an die Erdoberfläche (Tab. 3).

In Kombination mit einer manuellen Klassifikation der Punktdaten kann in diesem Fall ein noch besseres Resultat erzielt werden. Dabei werden die Laserpunkte nach der Filterung mit der Gewichtungsfunktion in ArcGIS betrachtet, um Fehlklassifikationen zu identifizieren. Mit dem Geoverarbeitungswerkzeug LAS-Klassencode können beispielsweise über die Profilansicht falsch klassifizierte Punkte manuell identifiziert und in die richtige Klasse umgewandelt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht zwar eine eingehendere Analyse und Verbesserung der Filterung, ist jedoch sehr zeitaufwändig, subjektiv und anspruchsvoll.

2.3.3 Modellgenerierung

Viele verschiedene Studien belegen, dass die Wahl der Modellgenerierungsmethode die Eigenschaften des digitalen Geländemodells stark beeinflussen kann (Carrara et al., 1997; Wise, 2011; Wise, 2007; Lloyd & Atkinson, 2006; Aguilar et al., 2005). Da im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf der Filterung der Laserpunktdaten lag wurden für die Modellgenerierung sowohl bei der LasTools als auch bei der FUSION Software die Standardeinstellungen verwendet. Die Standardeinstellungen konnten mit gutem Gewissen verwendet werden, da die vorliegenden terrestrischen Laserdaten das Untersuchungsgebiet fast gesamt abdecken und so gut wie keine gewichtigen Datenlöcher vorliegen (Barneveld et al., 2013). Festzuhalten ist, dass beide Softwares spezifischere Parameter für eine umfassendere Modellgenerierung zur Verfügung stellen würden und diesbezüglich sicher noch ein gewisses Verbesserungspotential zu vermerken ist.

Im Rahmen der LasTools wurden mit `las2las.exe` die Bodenpunkte (Klasse 2) mit dem Parameter `'-keep_class 2'` für die weitere Verwendung extrahiert. Mit dem `lasgrid.exe` Tool konnte dann das eigentliche DHM generiert werden. Es handelt sich dabei um eine zellenbasierte Rasterung. Dabei kann man mit dem `'-step'` Wert die Auflösung des Modells bestimmen. Es wurden Geländemodelle mit verschiedenen Auflösungen generiert. Ein Wert von 0.2 spezifiziert ein Gebiet von 20x20cm für die Rasterung. Mit dem Parameter `'-fill'` kann der Umgang mit leeren Zellen (voids) definiert werden. Mit einem Wert von 10 werden mit einem quadratischen Suchradius von 10 Pixeln die Nachbarschaftszellen von leeren Rasterzellen nach Werten abgesucht und deren Durchschnittswert als neuer Wert für die leere Zelle definiert. Es handelt sich dabei entweder um leere Zellen, die aufgrund von Fehlklassifikationen oder aufgrund von Datenmängeln vorliegen. Das berechnete Modell kann direkt mit `lasgrid.exe` in einem gewünschten Format (beispielsweise TIFF) abgespeichert werden (Rapidlasso, 2013). Somit kann es anschliessend beispielsweise in ArcGIS weiterverarbeitet werden. Aus den neu generierten Höhenrastern wurden in ArcGIS mit der Toolbox Bildanalyse geschummerte Reliefs erstellt.

Die Modellgenerierung mit der FUSION Software erfolgte durch die Anwendung des Tools `GridSurfaceCreate`. Dabei wurde die gerasterte Erdoberfläche durch die Berechnung der Höhe jeder Rasterzelle anhand des durchschnittlichen Höhenwertes aller Punkte innerhalb der Zelle berechnet. Die Auflösung kann durch den Parameter `'-cellsize'` festgelegt werden. Jene Zellen, welche keine Werte aufweisen (voids) werden durch die Interpolation mit Werten umliegender Rasterzellen gefüllt (McGaughey, 2013).

Fest steht, dass nur durch intensives experimentieren mit Kombinationen verschiedener Parameter ein digitales Geländemodell erzielt werden kann, welches dem jeweiligen Verwendungszweck genau entspricht.

2.4 DTM Validierung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Verhalten eines Modells zu überprüfen und um zu erkennen ob das Modell für dessen Verwendung akzeptierbar ist (Rykiel, 1996). Der Validationsprozess eines digitalen Geländemodells kann eine Vielzahl an verschiedenen qualitativen und quantitativen Tests beinhalten. Gerade visuelle Methoden können statistische Methoden unterstützen und führen somit zu einer umfassenderen Qualitätsanalyse (Podobnikar, 2009). Wenn immer eine Modellvalidierung durchgeführt werden muss, müssen drei Punkte im Voraus erfüllt sein: (1) die Zielverwendung beziehungsweise der Zweck des Modells muss bekannt sein; (2) die Kriterien, welche das Modell erfüllen muss um akzeptiert zu werden, müssen festgelegt sein; und (3) der Kontext, in welchem das Modell verwendet werden soll muss bekannt sein (Rykiel, 1996).

Die zu erfüllenden Kriterien waren am schwierigsten zu definieren. Sicherlich muss das Geländemodell die charakteristische Topographie mit den Geländevariationen deutlich und möglichst realgetreu aufzeigen. Der Fehlerwert sollte aufgrund der durchgeführten Arbeiten (Erhebung der Bodenprofile) sowie den Einmessungen nicht mehr als 20cm (eine Spatenbreite) betragen. Dies ermöglicht sicher die Abbildung der topographischen Gegebenheiten mit den typischen Kuppen- und Muldenlagen. Die Darstellung des Mikroreliefs sollte im Sinne der weiteren Verwendung des Geländemodells möglichst genau sein, denn kleine Differenzen der Neigungswerte können sich schon zu signifikanten Variationen fortpflanzen (Barneveld et al., 2013). Weiter zu beachten ist, dass je höher die Auflösung der Datengrundlage ist, desto schwieriger ist die Evaluation und Bewertung des daraus resultierenden digitalen Geländemodells (Podobnikar, 2009). Die Genauigkeit stellt gemäss Kraus et al. (2006) das beste Mass für die Beschreibung der Qualität eines digitalen Geländemodells dar. Dabei ist zu beachten, dass das Gelände, die Messobjekte, das Messgerät (Barneveld et al., 2013), die Dichte der Kontrollpunkte sowie die Interpolationsmethode signifikante Einflüsse auf die Genauigkeit und somit die Qualität der digitalen Geländemodelle haben (Aguilar et al., 2005; Costantino & Angelini, 2013). Wichtig für die Qualität ist generell, dass erstens überflüssige Nichtbodenpunkte entfernt wurden, dass zweitens potentielle Messfehler beachtet wurden und, dass drittens der erhaltene Durchschnittswert der Höhe pro Rasterzelle eine gute Abschätzung des aktuellen realen Höhenwertes darstellt (Barneveld et al., 2013). Festzuhalten ist, dass die Qualität der neu generierten digitalen Geländemodelle wichtig für die entscheidende Auswahl der besten Modelle ist sowie entscheidende Hinweise über die Bearbeitung der terrestrischen Laserdaten gibt und die späteren Bodenmodellierungen beeinflusst.

Um eine erste Aussage über die Qualität der neu generierten digitalen Geländemodelle zu ermöglichen und vor allem um die besten Modelle für die folgende Modellierung der Bodenacidität im zweiten Teil der Arbeit vorzunehmen wurde sowohl eine quantitative als auch eine qualitative Validierung durchgeführt. Zuerst wurde mit Referenzdaten der RMSE als statistisches Mass für die Genauigkeit eines Geländemodells berechnet. Anhand dieser Resultate wurden die quantitativ besten Modelle für eine visuelle Validierung ausgewählt. Im Folgenden sind die Referenzdaten kurz vorgestellt und das Vorgehen der Validierungen erläutert.

2.4.1 Referenzdaten

Der klassische Ansatz für eine Validierung eines digitalen Geländemodells ist der Vergleich des Geländemodells mit einer definierten Anzahl von Kontrollpunkten. Dabei ist es wichtig, dass diese Kontrollpunkte mit einer anderen Vermessungstechnologie wie der Tachymetrie oder mittels GPS eingemessen wurden und somit eine grundlegende Genauigkeit vorausgesetzt werden kann (Lane et al., 2003).

Als Basis für die Referenzdaten dienten die Standorte der Bodenprofile. Sie wurden während der Feldarbeit für die Entnahme von Proben für die Messung der pH-Werte verwendet und eingemessen. Die gemessenen Höhwerte (Z-Werte) dieser Bodenprofilstandorte werden im Rah-

men der quantitativen Validierung als Kontrollwerte verwendet. Dabei wurden die eingemessenen Höhenwerte mit den berechneten Höhenwerten aus den neu generierten digitalen Geländemodellen verglichen. Gesamthaft liegen 62 Kontrollpunkte vor. Ein Grossteil dieser Punkte wurde mit einem Tachymeter TPS1200 von Leica (Leica, 2009) eingemessen. Sie weisen eine Messgenauigkeit von $2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ auf und wurden über einen festgelegten Ursprungspunkt sowie diverse Hilfspunkte eingemessen. Dabei wurde sowohl mit als auch ohne Reflektor über Winkelmessung die Position der Kontrollpunkte bestimmt. Die Genauigkeit der endgültig eingemessenen Höhe hängt dabei neben der Messgenauigkeit zusätzlich von der Stabilität des Messgerätes, Position der Hilfspunkte (beispielsweise beeinflusst durch Rutschungen oder nasen Boden) sowie von anderen Einflüssen ab. Die Abweichung der Genauigkeit kann dabei beispielsweise durch eine erschwerte Sicht aufgrund von trübem Wetterbedingungen oder Hitzeblimmern eingeschränkt werden (mündliche Quelle). Dies muss bei der anschliessenden Analyse und Interpretation der Validierungsergebnisse im Hintergrund behalten werden.

Insgesamt wurden 6 der 62 Bodenpunkte mit einem Laserdistanzmessgerät Leica Disto D8 (Leica, 2011) eingemessen. Die Messgenauigkeit liegt dabei bei $\pm 1.0\text{mm}$ auf 10m. Dennoch können die Messungen aufgrund der messtechnischen Eigenschaften sowie der Anwendung eine leicht geringere Genauigkeit als die übrigen Punkte aufweisen (mündliche Quelle).

Die Messgenauigkeit des terrestrischen LiDAR Scanner FARO Focus 3D liegt ebenfalls bei $\pm 2\text{mm}$ auf 25m Messdistanz. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Genauigkeit der Referenzdaten etwa auf dem gleichen Niveau wie jene der terrestrischen Laserdaten befindet und somit eine gute Grundlage für die quantitative Validierung der Geländemodelle gewährleistet ist.

2.4.2 Quantitative Validierung

Ein weitverbreitetes Mass für die Genauigkeit von digitalen Geländemodellen (Aguilar et al., 2005) ist der Root Mean Square Error (RMSE) (Li, 1988; Yang & Hodler, 2000). Dabei stellt $Z^{\text{estimated}}$ minus Z^{real} die Residuen an den Kontrollpunkten dar und n die Anzahl dieser Punkte:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^{\text{estimated}} - Z_i^{\text{real}})^2}{n}} \quad (3)$$

Verschiedene Autoren schlagen auch noch andere statistische Masse vor (Daniel & Tennant, 2001; Podobnikar, 2009; Bowen & Waltermire, 2002). Für jedes neu generierte Geländemodell wurde der Wert der Z-Koordinate an jedem der 62 Kontrollpunkte extrahiert. Dafür wurde das ArcGIS Tool Oberflächenfunktionen (3D Analyst Toolbox) verwendet. Im Anschluss wurde der Fehlerwert (RMSE), sowie der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

2.4.3 Qualitative Validierung

Visuelle Methoden ermöglichen primär, einen ersten Eindruck der Datenqualität zu gewinnen (Podobnikar, 2009). Mit der qualitativen Validierung soll im Sinne einer visuellen Betrachtung der digitalen Geländemodelle eine Aussage darüber gewonnen werden, ob die berechneten Daten des Modells mit der Wirklichkeit übereinstimmen (Rykiel, 1996). Umfassende Kenntnisse über das vorliegende Untersuchungsgebiet (beispielsweise Fotos) mit seinen topographischen Gegebenheiten und Gebieten mit potentiellen Schwierigkeiten unterstützen diesen Prozess. In Podobnikar (2009) werden verschiedene Methoden für die visuelle Validierung beschrieben und die Notwendigkeit für eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Methoden hervorgehoben. Für die visuelle Validierung wurden digitale Geländemodelle mit einem RMSE Fehlerwert $< 20\text{cm}$ ausgewählt.

Im ersten Teil der qualitativen Validierung wurde ein kleines Gebiet (40x40m) ausgewählt, welches eine gut beurteilbare Topographie aufweist. Der Ausschnitt stellt eine Fahrspur dar,

welche durch den Holztransport verursacht wurde. Dieser Ausschnitt eignet sich sehr für eine visuelle Validierung, da es sich um ein eindeutiges Merkmal handelt, das gut erkennbar und vor allem vergleichbar ist. Der Ausschnitt wurde auf Sichtbarkeit, Vollständigkeit und Detailgrad untersucht und bewertet. Tab. 10 in Kapitel 4.1.3 gibt Auskunft über dieses Bewertungsschema. Für ein genaueres und vor allem aussagekräftigeres Resultat müsste ein zweiter Ausschnitt gewählt werden.

Im zweiten Teil dieser Visualisierung wurden 10 zufällige Bodenpunkte ausgewählt. Es handelt sich dabei jedoch nur um Punkte, bei denen aufgrund der Feldarbeit (und mithilfe von Fotos) bekannt ist, ob es sich topographisch eindeutig um eine Kuppe oder eine Mulde handelt. Bei jedem neuen digitalen Geländemodell wurden die ausgewählten Bodenpunkte betrachtet und nach ihrer Topographie bewertet. Diese visuelle Betrachtung hätte in einer umfangreicheren Validierung zusätzlich noch mit der Berechnung der Krümmung über das Untersuchungsgebiet ergänzt und somit vereinfacht werden können (Podobnikar, 2009).

Fest steht, dass beide Validierungen mit einem gewissen Grad an Subjektivität behaftet sind (Mayer & Butler, 1993).

3 Methodik Teil II – Modellierung der Bodenacidität

In diesem Kapitel wird die Datengrundlage für die Modellierung der Bodenacidität sowie das methodische Vorgehen aufgezeigt und beschrieben.

3.1 Datengrundlage

3.1.1 pH-Daten

Die Bodenreaktion (pH-Wert) eines Bodens gibt Auskunft über dessen Entstehung und die daraus resultierenden chemischen Eigenschaften. Zudem können Aussagen über die Eignung des Bodens als Standort für Pflanzen und als Lebensraum für Bodenorganismen sowie Nähr- und Schadstoffverhältnisse gemacht werden. Neben der Farbe, der Textur und dem Gehalt an organischer Substanz gilt der Boden-pH als einer der wichtigsten Bodenkenngößen. Die Versauerung des Bodens im Laufe der Pedogenese ist unter humiden Klimabedingungen ein natürlicher Prozess, denn pro Zeiteinheit werden mehr Protonen durch Niederschläge oder durch bodeninterne Prozesse eintragen beziehungsweise freigesetzt als wieder im Boden neutralisiert werden können. Die löslichen Produkte aller chemischen Reaktionen bei denen Protonen verbraucht werden, werden mit dem Sickerwasser ausgewaschen und gehen somit dem Boden verloren. Die Puffersysteme eines Bodens werden dadurch zunehmend erschöpft, dies bedeutet, dass die Säureneutralisationskapazität des Bodens immer weiter abnimmt und der Boden eine zunehmende Acidität entwickelt. Die Neutralisation dieser Bodenacidität erfordert jedoch wiederum die Zufuhr von Basen wie beispielsweise Kalk. Die Bodenacidität bezieht sich folglich auf den Basengehalt, die einem sauren Boden zugeführt werden müssten um seinen pH-Wert in den neutralen Bereich zu heben. Das Relief hat einen starken Einfluss auf die Auswaschung und somit die Acidität des Bodens, denn die Höhenlage, Geländeform und Exposition haben eine entscheidende Wirkung auf die Schwerkraft und somit auf den Wasserfluss. Dadurch werden nicht nur die bodenchemischen Eigenschaften geprägt, sondern vor allem die gesamte Bodenentwicklung (Blume et al., 2010).

Der pH-Wert der meisten natürlichen Böden liegt im Wertebereich zwischen pH 3 und 8-10. Abb. 13 zeigt den möglichen pH Wertebereich mit den Einstufungen. In humiden Klimagebieten sind saure Böden weit verbreitet, denn sobald die Carbonate in den Gesteinen aufgelöst und ausgewaschen wurden, beginnen die Böden zu versauern. Viele Waldböden in Mitteleuropa mit Braunerden sind stark versauert. Extrem saure pH-Werte finden sich dabei vor allem in den organischen Auflagehorizonten von Waldböden (unter Nadelbäumen) (Blume et al., 2010).

pH-Wert (CaCl ₂)	Einstufung	Vorkommen
< 3,0	extrem sauer	Sulfatsaure Böden
3,0...3,9	sehr stark sauer	Podsole, Hochmoore, saure (Para-)Braunerden
4,0...4,9	stark sauer	mittelbasische (Para-)Braunerden
5,0...5,9	mäßig sauer	basenreiche (Para-)Braunerden
6,0...6,9	schwach sauer	Gypsic Solonchake, Gypsisole
7,0	neutral	
7,1...8,0	schwach alkalisch	(Para-)Rendzinen
8,1...9,0	mäßig alkalisch	Solonchake, Solonetze
9,1...10,0	stark alkalisch	Solonchake, Solonetze
10,1...11,0	sehr stark alkalisch	Solonchake mit Soda
> 11,0	extrem alkalisch	Solonchake mit Soda

Abb. 13: pH-Wertebereich und Einstufung (Blume et al., 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit sollte die Bodenacidität auf der Untersuchungsfläche im Alptal modelliert werden. Dafür wurden pH-Daten an verschiedenen ausgewählten Standorten erhoben.

Gemäss dem Sample Design (Stichprobenplan) wurden

- stratifizierte Bodenprofile für die Abdeckung der pH-Werte an unterschiedlichen topographisch charakteristischen Standorten,
- reguläre Bodenprofile für die Abdeckung des geographischen Raumes und
- zufällige Bodenprofile für die Validierung des Modelles

ausgewählt. Abb. 14 zeigt die Standorte der Bodenprofile gemäss diesem Sample Design. Die Standorte der Bodenprofile sollten die natürliche Bodenacidität mit den durch das Mikrorelief beeinflussten Unterschieden möglichst gut abbilden.

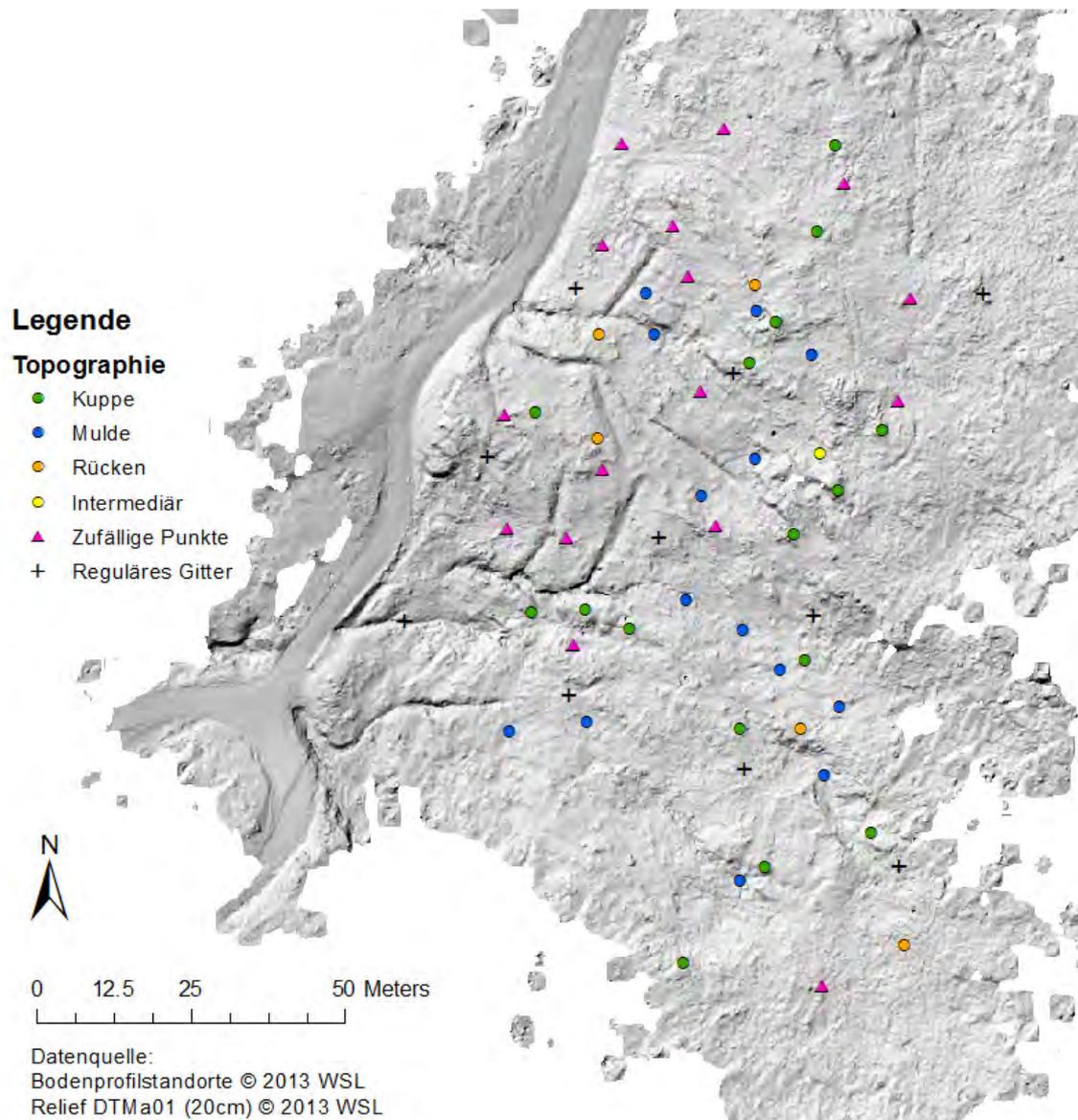


Abb. 14: Sample Design der Bodenprofile.

Gesamthaft wurden 62 Bodenprofile erhoben und bodenkundlich untersucht. Dabei lag der Fokus primär auf der Festlegung des Bodentyps. Wie schon in Kapitel 1.3 aufgegriffen, wird das Untersuchungsgebiet durch ein charakteristisches Mikrorelief geprägt. Die kleinräumlichen Kuppen- und Muldenlagen werden gemäss der Grundhypothese dieser Arbeit (Kapitel 1.4) gegensätzlich durch die Bodenacidität beeinflusst. Auf den Kuppen finden sich deshalb die für die sauren Standorte typischen Braunerden und in den basischen Mulden typische Böden vom Typ Gley (siehe Kapitel 1.3).



Abb. 15: Bodenprofil Typ Braunerde.

Es wurden aus jedem Bodenprofil Proben in 5-10cm und in 20-30cm Tiefe entnommen. Für die anschliessende Bodenmodellierung wurden die pH-Daten des Oberbodens verwendet (5-10cm Horizonttiefe). Diese Proben wurden anschliessend im Labor der WSL ausgewertet. Mit dem Boden-pH ist der pH-Wert des Bodens gemeint, der sich in einer wässrigen Bodenlösung einstellt, welche mit dem Boden ins Gleichgewicht gebracht wurde. Er ist definiert als negativer Logarithmus der H^+ -Aktivität. Dazu wurden zuerst die Bodenproben bei $60^{\circ}C$ getrocknet bis ein konstantes Gewicht vorlag und dann mit einem 2mm Sieb gesiebt. Dann wurden jeweils 10g Boden mit 25ml einer 0.01 M $CaCl_2$ Lösung versetzt und dann für mindestens 30 Minuten geschüttelt. Anschliessend konnte der pH-Wert dieser Suspension mit einer Elektrode gemessen werden (Blume et al., 2010). Der Wertebereich der pH-Daten liegt zwischen 3.51 und 6.50. Abb. 16 zeigt die pH-Werte der einzelnen Bodenprofile im Untersuchungsgebiet. Auf den ersten Blick lässt sich keine Beziehung zwischen der Bodenacidität und den Reliefeinheiten erkennen. Im Feld erkennt man jedoch das spezifische Mikrorelief mit den Kuppen (Abb. 18) und Mulden (Abb. 17) und die damit einhergehende Vegetation.

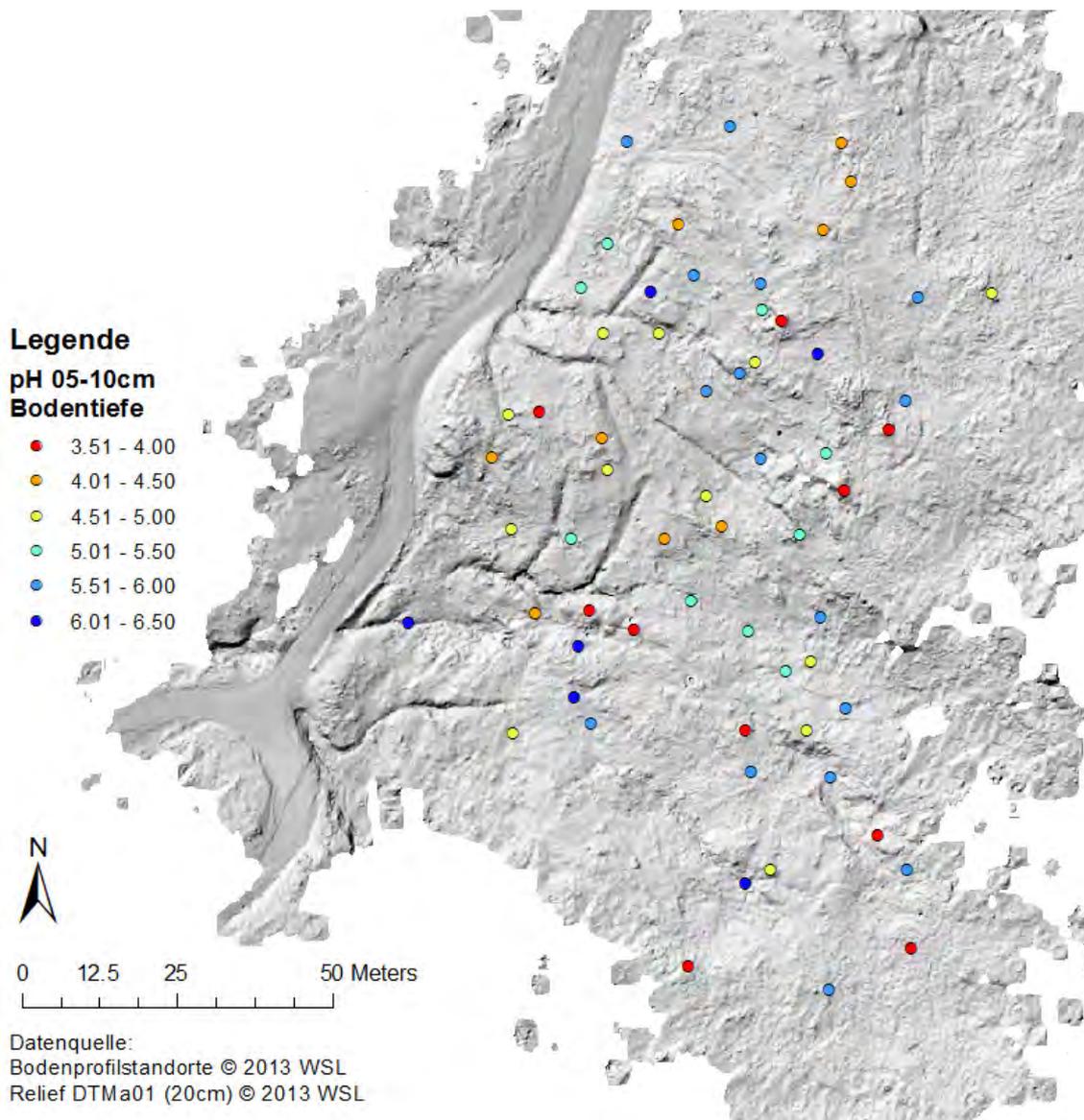


Abb. 16: pH-Werte der Bodenprofile im Untersuchungsgebiet.



Abb. 17: Beispiel Mulde (Bodenprofil BS25). Abb. 18: Beispiel Kuppe (Bodenprofil BS605).

Die vorliegenden Daten zeigen, dass sich der Boden, wie für einen mitteleuropäischen Nadelwald typisch (Frehner et al., 2005), in einem sauren bis neutralen, leicht basischen Bereich befindet. Abb. 19 zeigt, dass die 62 pH-Proben normalverteilt sind und sie sich deshalb sehr gut für die anschließende Modellierung eignen.

Im Bezug auf die Modellierung muss beachtet werden, dass die pH-Werte des Oberbodens sehr variabel sind. Trotzdem sollte es möglich sein in diesem Untersuchungsgebiet die Bodenacidität anhand der Topographie kontinuierlich zu schätzen um somit Aussagen über die Bodeneigenschaften von Flyschregionen der Schweiz zu gewinnen.

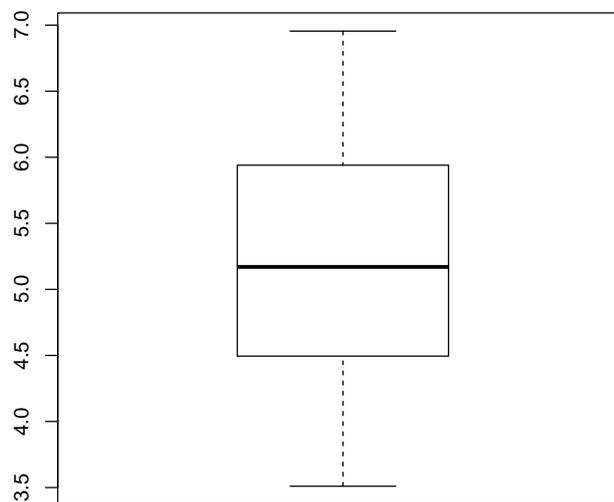


Abb. 19: Verteilung der pH-Daten.

3.1.2 Erklärende Variablen

Bei den erklärenden Variablen (auch Umweltprädikatoren) handelt es sich um die topographischen und hydrologischen Attribute, welche für die Modellierung der Bodenacidität verwendet wurden. Wie schon in Kapitel 1.4 festgehalten, erfolgte die Bodenmodellierung im Rahmen dieser Arbeit nur anhand der Topographie. Alle anderen Umweltfaktoren (beispielsweise Klima

oder Geologie) bleiben konstant und wurden nicht in die Modellierung miteinbezogen. Die berechneten erklärenden Variablen sollen das Untersuchungsgebiet bezüglich den topographischen und hydrologischen Gegebenheiten möglichst gut abbilden. Dabei ist vor allem die Charakterisierung der typischen Kuppen- und Muldenlagen wichtig. Abb. 20 und Abb. 21 zeigen den Topographischen Feuchtigkeitsindex (original, 20cm) und den Topographischen Positionsindex (geglättet, Radius 3 Zellen) auf. Sie wurden vom DTMa01 (20cm) abgeleitet und verdeutlichen das ausgeprägte Mikrorelief.

In der folgenden Tabelle sind die verwendeten erklärenden Variablen aufgelistet und kurz beschrieben. Sie wurden für jedes unterschiedlich aufgelöste digitale Geländemodell berechnet.

Erklärende Variable	Berechnung	Einheit/Beschreibung
Ausrichtung (transformiert)	ArcGIS, Spatial Analyst: Aspect	0-360°, Richtung von Wasserflüssen
Neigung	ArcGIS, Spatial Analyst: Slope	0-90°, Geschwindigkeit von Wasserflüssen
Krümmung (horizontal und vertikal)	ArcGIS, Spatial Analyst: Curvature (planar, profile)	1/100m <i>vertikal</i> : Verlangsamung der Wasserflüsse <i>horizontal</i> : Konzentration von Wasserflüssen
Abflussakkumulation	ArcGIS, Spatial Analyst: Flow Accumulation	Index, <i>hohe Abflussakkumulation</i> : konzentrierter Wasserfluss (Wasserkanäle) <i>keine Abflussakkumulation</i> : lokale topographische Höhen
Entfernung entlang des Fliesspfades (flussaufwärts und flussabwärts)	ArcGIS, Spatial Analyst: Flow-length (upstream, downstream)	Index, <i>flussaufwärts</i> : von jeder Zelle bis zur Wasserscheide <i>flussabwärts</i> : von jeder Zelle bis zur Senke
Topographischer Positionsindex (TPI)	Jennessent (2006)	Index, <i>positiver Wert</i> : Kuppenlage <i>negativer Wert</i> : Muldenlage
Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI) – single flow	ArcGIS, Spatial Analyst, ArcScripts (ArcPy) ESRI (2010)	Index, <i>hoher Wert</i> : Muldenlage <i>tiefer Wert</i> : Kuppenlage räumliche Verteilung der Wassersättigung

Tab. 5: Übersicht und Beschreibung der abgeleiteten erklärenden Variablen (Wilson & Gallant, 2000).

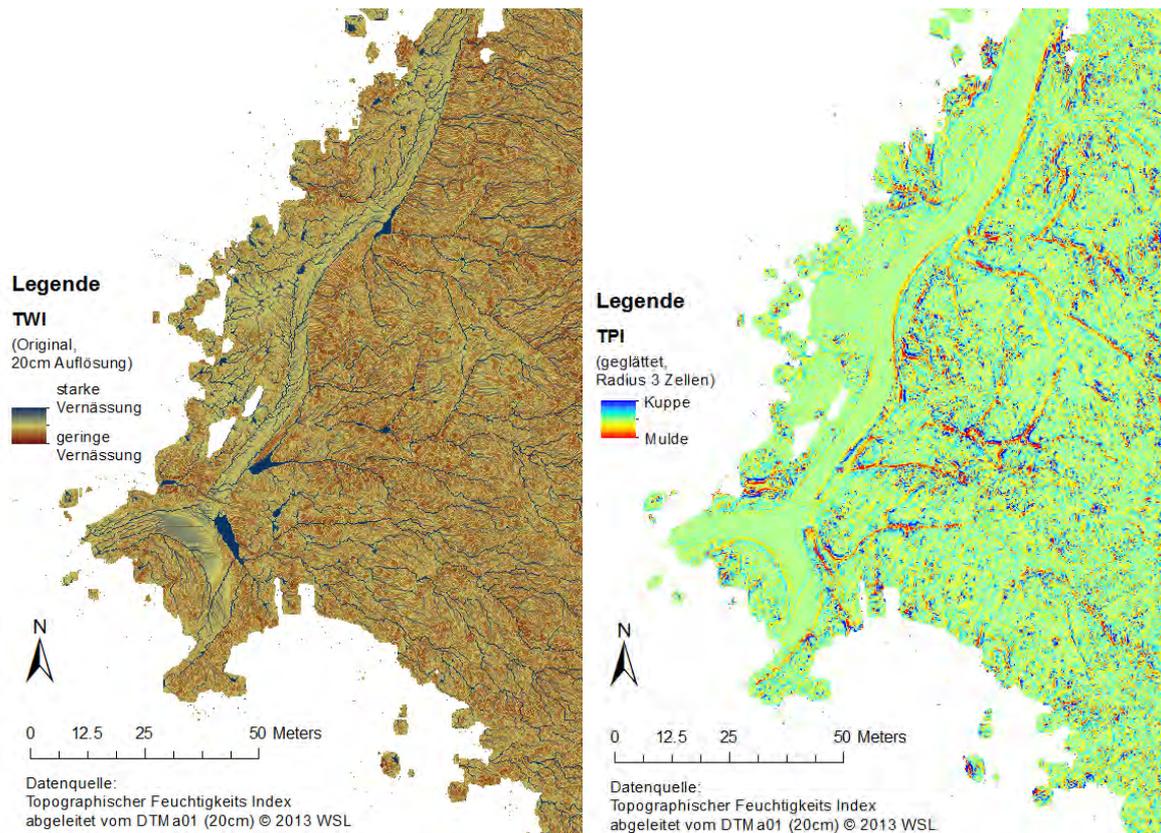


Abb. 20: Topographischer Feuchtigkeitsindex, 20cm Auflösung (original).

Abb. 21: Topographischer Positionsindex, Glättung mit Radius von 3 Zellen.

3.1.3 Swisalti3D

Das Swisalti3D ist ein sehr präzises digitales Höhenmodell, das die Erdoberfläche der Schweiz ohne Objekte wie Bebauung oder Bewuchs beschreibt. Es besteht aus bereinigten und interpolierten luftgestützten LiDAR Daten, die als Rastergitter mit den Auflösungen 2m, 5m und 10m in verschiedenen Formaten verfügbar sind. In einem Zyklus von 6 Jahren werden die Daten nachgeführt. Die Genauigkeit aller drei Dimensionen entspricht bei den Laserpunkten unterhalb von 2000 m. ü. M. ± 0.5 m. Das Swisalti3D stellt für verschiedenen Anwendungen und Forschungsfragen eine ideale Grundlage (Swisstopo, 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Swisalti3D (2013) mit einer Auflösung von 2m für Vergleiche mit Modellen aus terrestrischen LiDAR Daten verwendet.

3.2 Datenaufbereitung

Für die Modellierung der Bodenacidität sollten möglichst viele verschiedene erklärende Variablen zur Verfügung stehen. Dabei sollten die topographischen und hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes in verschiedenen Skalenbereichen abgebildet werden. Daher wurden erstens die abgeleiteten Variablen zusätzlich noch mit verschiedenen Nachbarschaftsgrößen geglättet und zweitens Interaktionsvariablen gebildet. Zu erwähnen ist im Bezug auf die Datenaufbereitung noch, dass keine Transformation der Zielvariable nötig war, da sich die Daten schon normalverteilt verhielten und die pH Daten sowieso schon einen Logarithmus darstellen. Eine Transformation der Zielvariablen wäre jedoch nötig wenn die Modellannahmen angepasst werden müssten (Hengl et al., 2004). Im Folgenden werden die methodischen Ansätze für die Glättung der abgeleiteten Variablen sowie für die Bildung der Interaktionsvariablen beschrieben.

3.2.1 Glättung der erklärenden Variablen

Um den Einfluss der Skala in der digitalen Bodenkartierung systematisch zu untersuchen gibt es verschiedene methodische Ansätze. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein multi-skalärer Ansatz angewendet (Behrens et al., 2010). Dies weil schon in vielen Studien festgestellt wurde, dass die Skala welche in der Auflösung des digitalen Geländemodell implementiert ist, nicht zwingend am geeignetsten für die Beschreibung von Böden im Kontext ihrer Umwelt ist (Smith et al., 2006). Der optimale Skalenbereich ist abhängig von der Landschaft (Cavazzi et al., 2013) und somit kann beispielsweise auch die relative Grösse von geomorphologischen Formen als Richtlinie für die Wahl des Skalenbereiches in einer Untersuchung dienen (Roecker & Thompson, 2010).

Damit im Rahmen der Bodenmodellierung Aussagen über den dafür benötigten Skalenbereich gemacht werden können wurden die berechneten Umweltprädikatoren mit verschiedenen Nachbarschaftsgrössen geglättet. Dies ist ein möglicher Weg, um die Effekte von unterschiedlichen Skalenbereichen zu betrachten (Muñoz & Kravchenko, 2012). Die erklärenden Variablen wurden für jedes digitale Geländemodell nach dem gleichen Prinzip geglättet und vorbereitet. Dazu wurde das Tool Focal Statistics des Spatial Analyst in ArcGIS verwendet. Für die Glättung wurde der Nachbarschaftstyp Kreis in Form von unterschiedlichen Radien (Nachbarschaftsgrössen) angewendet. Es wurde in allen Fällen jeweils der Mittelwert der Zellen innerhalb der Nachbarschaft berechnet und bei einigen Glättungen (Tab. 6) (Behrens et al., 2010) zusätzlich noch der Medianwert oder der Maximal- und Minimalwert der Nachbarschaftszellen. Die verschiedenen statistischen Typen wurden berechnet, um eine möglichst grosse Anzahl der verschiedenen erklärenden Variablen für die Modellierung zur Verfügung zu haben. Die Nachbarschaftsgrössen waren jeweils von der Auflösung der abgeleiteten erklärenden Variablen respektive von der Auflösung des dafür verwendeten digitalen Geländemodelles abhängig. Die Nachbarschaftsgrössen variieren deshalb von minimal 2 bis maximal 30 Zellen und könnten somit unterschiedliche Skalenbereiche abdecken. Ziel war, dass sich die geglätteten Variablen für spätere Vergleiche in jeweils ähnlichen Skalenbereichen befinden. Im Folgenden wurden die geglätteten erklärenden Variablen sowie die original abgeleiteten Variablen für die statistische Modellierung verwendet.

Abb. 22 zeigt exemplarisch die Glättung des Topographischen Positionsindexes über die Untersuchungsfläche im Alptal. Erkennbar ist, dass sich mit zunehmendem Skalenbereich die Reliefheiten ändern. Dies ermöglicht es im Anschluss an die Modellierung Aussagen über den optimalen Skalenbereich für die Beschreibung der Bodenacidität anhand der Topographie zu gewinnen.

DTM	Auflösung [cm]	Nachbarschaftsgrössen [Anzahl Zellen]	Statistiktyp	Skalenbereich [cm]
DTMa01	20	3, 6, 9, 12, 18, 30	mean, median, max., min., std.	20-600
DTMa02	80	3, 6, 9	mean, median	80-640
DTMa03	200	2, 3, 4	mean, median	200-800
DTMa04	60	2, 3, 4, 6, 8	mean	60-480
DTMa05	400	2	mean	400-800
DTMa06	20	3, 6, 9, 12, 18	mean	20-360
Swissalti3D	200	2, 3, 4, 6, 9	mean, median	200-1800

Tab. 6: Übersicht über die verwendeten Nachbarschaftsgrössen (in Zellen) und Statistiktypen zur Glättung der erklärenden Variablen der verschiedenen Geländemodelle mit den daraus folgenden Skalenbereichen.

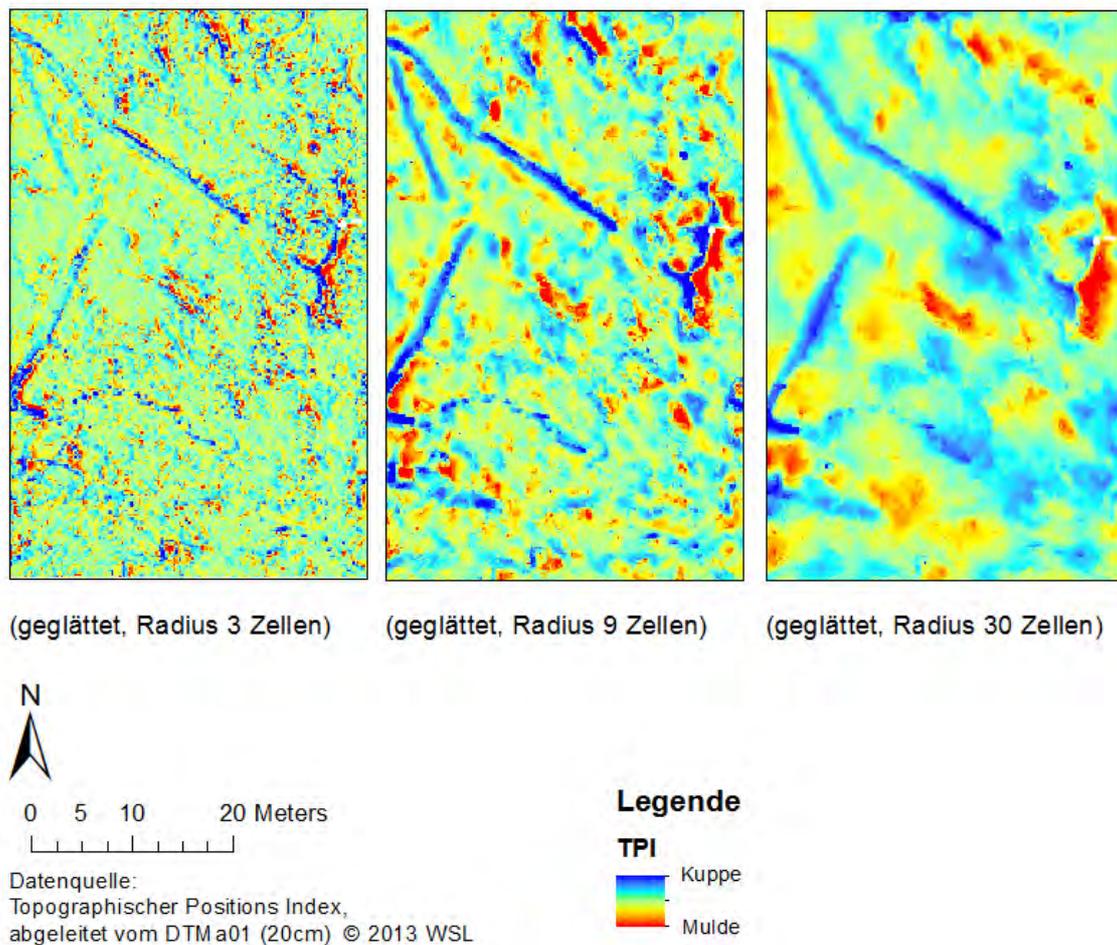


Abb. 22: Topographischer Positionsindex (originale Auflösung 20cm) mit verschiedenen Glättungen.

3.2.2 Interaktionsvariablen

Interaktionsvariablen bestehen aus der Multiplikation zweier oder mehrerer erklärender Variablen, anhand deren überprüft werden soll, ob Variablen neben einem separaten Effekt auch einen gemeinsamen Einfluss auf die Modellierung haben (Kadiyala, 1970).

In einem ersten Schritt wurden die ausgewählten Variablen zentriert um die Multikollinearität zwischen den beiden erklärenden Variablen abzuschwächen (Hengl et al., 2004), dabei wurde von jedem der 62 Variablenwerte der Mittelwert aller 62 Variablenwerte abgezogen. Und in einem zweiten Schritt wurden dann die beiden Variablen miteinander multipliziert und anschließend in die statistische Modellierung miteingeschlossen. Im Rahmen dieser Modellierung sollten die topographischen und hydrologischen Gegebenheiten verstärkt betrachtet werden. Je nach Bedeutung einzelner Skalenbereiche in einer Modellierung wurden einzelne, ausgewählte Interaktionsvariablen gebildet. Tab. 7 zeigt die Kombination von erklärenden Variablen, die in den meisten Modellen gewählt wurde.

Erklärende Variable 1		Erklärende Variable 2
Topographischer Positionsindex (TPI)	x	Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI)
Topographischer Positionsindex (TPI)	x	Aufstiegsentfernung flussaufwärts
Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI)	x	Hangneigung
Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI)	x	Horizontalkrümmung
Aufstiegsentfernung flussaufwärts	x	Hangneigung
Aufstiegsentfernung flussaufwärts	x	Horizontalkrümmung
Abflussakkumulation	x	Hangneigung
Abflussakkumulation	x	Horizontalkrümmung

Tab. 7: Interaktionsvariablen: Multiplikation zwischen erklärender Variable 1 und 2.

3.3 Statistische Modellierung

Im Rahmen der digitalen Bodenkartierung können verschiedenen methodische Ansätze für die Beschreibung einer Boden-Landschaftsbeziehung wie beispielsweise für die Modellierung der Bodenacidität verwendet werden. In Scull et al. (2003) wird ein guter Überblick über verschiedenen mögliche Modellierungsmethoden im Kontext der digitalen Bodenkartierung gegeben. Methoden der Regressionsanalyse (beispielsweise generalisierte lineare Modelle oder geographisch gewichtete Regressionen) werden dabei am häufigsten für Bodenmodellierungen verwendet (Grunwald, 2009).

Für alle statistischen Analysen im Rahmen dieser Arbeit wurde die Software R V. 3.0.2 (R Software, 2013) verwendet. Informationen zu den jeweiligen Skripten befinden sich im Anhang (Anhang B).

3.3.1 Variablenselektion

Um die Beziehung zwischen dem Boden-pH und den verschiedenen erklärenden Variablen in unterschiedlichen Skalenbereichen genauer zu untersuchen und um zusätzlich eine mögliche Multikollinearität (Redundanz) (Backhaus et al., 2006) zwischen den Variablen aufzudecken, wurden Korrelationsanalysen (Pearson r) durchgeführt (Baltensweiler & Zimmermann, 2010). Um eine erste Variablenselektion zu vollziehen, wurden alle Variablen mit einem Korrelationskoeffizienten (r) ≤ -0.80 und $\geq +0.80$ identifiziert und jeweils eine der beiden erklärenden Variablen entfernt. Dabei wurde zusätzlich noch auf den Koeffizienten der jeweiligen, erklärenden Variable zur abhängigen Variable pH geachtet. Es wurde daher jeweils diejenige erklärende Variable entfernt, deren Korrelation zur Zielvariable pH tiefer war. Somit konnte gewährleistet werden, dass möglichst keine erklärenden Variablen entfernt wurden, die eine starke Beziehung zur Bodenacidität aufweisen. Die Korrelationsanalysen wurden für jedes digitale Geländemodell beziehungsweise für jede Gruppe von erklärenden Variablen eines Geländemodelles separat durchgeführt und geben einen ersten Eindruck in die Stärke der Beziehungen zwischen den abgeleiteten Variablen sowie zur Zielvariable pH auf.

Für die Modellierung der Bodenacidität ist es wichtig, dass möglichst aussagekräftige, erklärende Variablen in die multiplen Regressionsanalysen miteingeschlossen werden. Aus diesem Grund wurde die Selektion der Variablen zusätzlich zu der Korrelationsanalyse mit Erfahrungen aus dem Untersuchungsgebiet und bodenkundlichem Wissen gestützt. Es sollte genau überlegt werden, in welchem Zusammenhang die verschiedenen erklärenden Variablen zur Bodenacidität stehen, wobei vor allem die Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes sowie auch deren physikalische Bedeutung grundlegend waren. So lässt sich beispielsweise vermuten, dass die erklärenden Variablen mit hydrologischen Informationen neben den topographischen Variablen auch einen grossen Einfluss auf die Beschreibung der Bodenacidität haben. Diese Überlegungen betreffen auch die Wahl des Skalenbereiches für eine erklärende Variable. Beispielsweise kann

man davon ausgehen, dass die hydrologischen Variablen einen grossen Skalenbereich umfassen müssen, da sie durch das gesamte Einzugsgebiet beeinflusst werden.

Diese kombinierte methodische Herangehensweise führt zu einer überlegten Auswahl der potentiellen erklärenden Variablen für die Modellierung der Bodenacidität.

3.3.2 Multiple lineare Regressionsanalyse

In dieser Arbeit wurde für die Modellierung der Bodeneigenschaft der methodische Ansatz der multiplen linearen Regression angewendet. Die multiple lineare Regression basiert dabei auf der Methode der kleinsten Quadrate. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode kann in Stahel (2007) oder Hastie et al. (2005) gefunden werden.

Mit der multiplen linearen Regressionsanalyse können alle möglichen Kombinationen von potenziellen erklärenden Variablen und der Zielvariable (pH) überprüft werden. Dabei werden unter Berücksichtigung mehrerer unabhängiger Variablen Regressionsmodelle gesucht, welche die abhängige Variable im Kontext des Untersuchungsgebietes am besten erklären können. Die Analyse basiert standardgemäss auf einem globalen Modell, das eine einzelne Regressionsgleichung für die Darstellung des vorliegenden Prozesses verwendet. Die Regressionsgleichung setzt sich dabei aus der abhängigen Zielvariable (Y) und den verschiedenen unabhängigen oder erklärenden Variablen (X) zusammen. Dabei ist jede unabhängige Variable mit einem Regressionskoeffizienten verknüpft, der die Stärke und Art der Beziehung dieser Variable zur Zielvariable beschreibt (β). Ein grosser Koeffizient weist dabei auf eine starke Beziehung hin und umgekehrt ein kleiner Koeffizient auf eine eher schwächere Beziehung. In der Gleichung ist ebenfalls noch der Zufallsfehler (ε) integriert. Dabei handelt es sich um den unerklärten Teil der abhängigen Variable. Die Differenz zwischen den beobachteten Y-Werten und den vorhergesagten Y-Werten wird als Residuen bezeichnet. Der Wert der Residuen einer Regressionsgleichung wird als Mass für die Modelleignung betrachtet. Grosse Werte weisen dabei auf eine eher niedrigere Modelleignung hin.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (4)$$

Ein Regressionsmodell ist nur dann zuverlässig und verwendbar, wenn sowohl die Daten als auch das Modell gewissen Annahmen entsprechen. Aus diesem Grund, sollte ein Modell immer auf

- die Linearität der Beziehung zwischen Y und X,
- die Nichtstationarität der erklärenden Variablen (keine regionale Variation),
- die Multikollinearität der erklärenden Variablen,
- die Heteroskedastizität,
- die räumliche Autokorrelation (keine Clusterbildung der Residuen),
- und auf die Normalverteilung der Residuen

geprüft werden (ESRI, 2013; Stahel, 2007; Backhaus et al., 2006).

Viele dieser Modellannahmen werden direkt im Rahmen der Regressionsanalyse durchgeführt und sind in dessen Ausgabe (Resultate) ersichtlich. Einige Annahmen wie die räumliche Autokorrelation müssen separat überprüft werden (beispielsweise mit der Berechnung des Moran's I (Moran, 1950) in ArcGIS oder in R). Ein guter Überblick über mögliche Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Modellfindung sowie deren Folgen und verschiedene Lösungsansätze wird in der ArcGIS-Hilfe im Bezug auf die Grundlagen zu Regressionsanalysen gegeben (ESRI, 2013).

Um die relevantesten erklärenden Variablen zu identifizieren wurde eine schrittweise Variablenselektion (beidseitig) durchgeführt. Für die Bestimmung des Haltepunktes wurde das Bayessche Informationskriterium (BIC) (Schwarz, 1978) verwendet. Das BIC bestimmt die Anzahl der miteinbezogenen Variablen und ermöglicht im Vergleich zum Akaike Informationskriterium (AIC) (Akaike, 1974) eine konsistentere Schätzung, da der Strafterm von der Stichprobengröße abhängig ist. Der kleinste BIC Wert wird verwendet, um das Modell mit dem tiefsten Fehlerwert und der geringsten Anzahl an erklärenden Variablen zu identifizieren (Hastie et al., 2005).

Anhand der Werte des multiplen und angepassten Bestimmtheitsmasses (R^2) sowie weiteren statistischen Parametern (wie F-Statistik und p-Wert), die in den Resultaten integriert sind und anhand des Wertes der schrittweisen Variablenselektion mit BIC, kann die Güte eines Modelles bestimmt werden. Um zu überprüfen, ob einige der soeben genannten Modellannahmen erfüllt wurden und ob Ausreisser vorhanden sind, können verschiedene statistische Diagramme für die visuelle Kontrolle verwendet werden (siehe Abb. 28) (Kleinbaum et al., 2013; Backhaus et al., 2006; ESRI, 2013):

- Residuen gegen die vorhergesagten Werte (Residuals vs Fitted):
zeigt auf, falls beim Schätzfehler (Residuen) ein systematischer Trend vorliegt.
- standardisierte Residuen mit dem Quantil-Quantil Diagramm (Normal Q-Q):
zeigt auf, ob die standardisierten Residuen normalverteilt sind.
- Wurzel aus dem Betrag der standardisierten Residuen gegen die vorhergesagten Werte (Scale-Location):
gibt Auskunft über die Varianzhomogenität der standardisierten Residuen.
- Residuen gegen die vorhergesagten Werte, standardisierte Residuen gegen die Masse der Hebelwirkung mehrerer erklärender Variablen (Residuals vs Leverage):
misst die Extremität der Punkte hinsichtlich einer oder mehrerer erklärender Variablen, das heisst misst wie weit ein Punkt von den anderen Daten entfernt liegt (horizontal und vertikal). Die darin integrierte Cook's Distanz zeigt auf, wie sehr ein Punkt die Koeffizienten der Regressionsgleichung beeinflusst.

Fest steht, dass das Erstellen einer Regressionsgleichung und das Suchen des besten Modelles ein stetiger, sich wiederholender Prozess ist. Wichtig ist, dass dabei das immer wieder die Modellannahmen überprüft werden und dass nur durch wiederholtes Entfernen und Hinzufügen von verschiedenen erklärenden Variablen das bestmögliche Regressionsmodell gefunden werden kann.

3.3.3 Validierung der Bodenmodellierung

Eine umfassende Validierung bietet die Methode der Kreuzvalidierung (Verbyla & Litvaitis, 1989). Angewendet wurde die k-fache Kreuzvalidierung, dabei werden die Daten in k möglichst gleich grosse Teilmengen aufgeteilt. Dann werden k Testläufe durchgeführt, bei denen die jeweils i-te Teilmenge als Testmenge und die verbleibende k-1 Teilmenge als Trainingsmenge verwendet werden. Als Mass für die Genauigkeit wurde das multiple sowie das angepasste Bestimmtheitsmass verwendet (Wollschläger, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Kreuzvalidierung $k = 10$ ausgewählt (bei einer Datenmenge von 62 Beobachtungspunkten). Eine detaillierte Beschreibung der k-fachen Kreuzvalidierung kann in Stone (1974) oder in Efron & Tibshirani (1994) gefunden werden.

4 Resultate

Aufbauend auf dem Kapitel 2 und 3 werden im vorliegenden Kapitel die Resultate präsentiert. Dabei werden die Resultate wieder getrennt nach Teil I Generierung der digitalen Geländemodelle (Kapitel 4.1) und Teil II Bodenmodellierung (Kapitel 4.2) aufgezeigt.

4.1 Digitale Geländemodelle

Für die Generierung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells wurden neu erfasste terrestrische Laserdaten verwendet. In der Prozesskette (Abb. 12) von den Rohdaten bis hin zum fertigen Geländemodell stellt die Filterung der Laserdaten den wichtigsten und schwierigsten Bearbeitungsschritt dar. Kapitel 4.1.1 geht daher vor allem auf die Resultate der unterschiedlichen Filteransätze und die damit einhergehenden Herausforderungen ein. In Kapitel 4.1.2 werden dann die verschiedenen generierten digitalen Geländemodelle aufgelistet und vereinzelt kurz beschrieben. Die Resultate der Modellvalidierung (Kapitel 4.1.3) zeigen die Qualität der neu generierten Modelle auf und ermöglichen so die Auswahl der besten digitalen Geländemodelle für die Bodenmodellierungen.

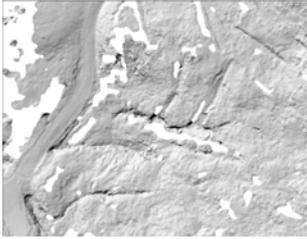
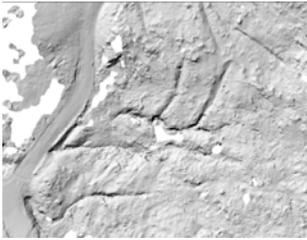
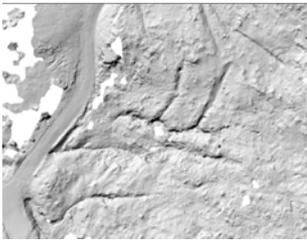
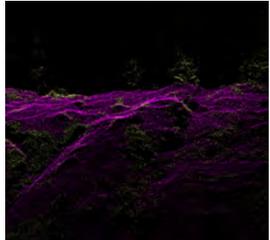
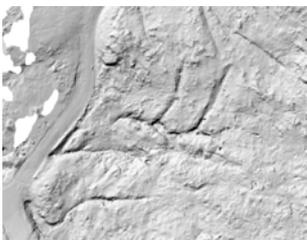
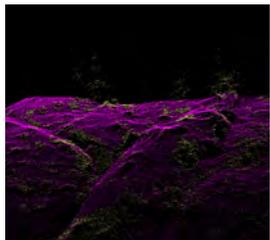
4.1.1 Filterung

Tab. 8 zeigt exemplarisch die Resultate der verschiedenen Filteransätze. Dafür wurde jeweils ein Ausschnitt des Untersuchungsgebietes wo die Ergebnisse der Klassifikation deutlich erkennbar sind ausgewählt. Der erste Ausschnitt stammt vom generierten Geländemodell, der zweite Ausschnitt zeigt die entsprechende Punktmenge nach der Filterung. Die roten Punkte stellen dabei die Bodenpunkte und die gelben Punkte die Nichtbodenpunkte dar. Klar ersichtlich ist, dass die verschiedenen Methoden und Parameter zur Filterung der Laserdaten zu teilweise erheblichen Unterschieden und somit zu fehlenden Daten und Löchern im anschließenden Geländemodell führten (beispielsweise '-wilderness'). Das Geländemodell Nr. 05 zeigt deutlich auf, dass in diesem Fall sehr viele eigentliche Bodenpunkte als Nichtbodenpunkte klassifiziert wurden. Im Gegensatz dazu zeigen die Geländemodelle Nr. 09, 11 und 13 eine gute Klassifizierung der Punktdaten. Abb. 23 lässt erkennen, dass die Filterung vor allem bei einem markanten Relief schwierig war.



Abb. 23: Foto des DTM Ausschnitts der in Tab. 8 dargestellten Filterproblematik

Abhängig von den vorliegenden Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet kommt es folglich zu deutlichen Fehlklassifikationen und somit zu teilweise markanten Veränderungen der Erdoberfläche im digitalen Geländemodell.

Software/ Methode	Nr.	Name	Ausschnitt DTM	Ausschnitt Punktdaten
<i>LasTools</i> lasground.exe: -wilderness, -ultra_fine, -not_airborne	05	DTMi_v10_20		
<i>LasTools</i> lasground.exe: -ultra_fine	07	DTM_v4_20		
<i>LasTools</i> lasground.exe: -wilderness	09	DTM_v6_20		
<i>LasTools</i> lasgrid.exe: -fill 10	11	DTM_v02_20_2		
<i>LasTools</i> lasgrid.exe: -fill 10	13	DTM_v08_20_2		

Tab. 8: Exemplarische Übersicht über verschiedene DTM Ausschnitte (Auflösung 20cm) mit den dazugehörigen Punktdaten, Klassifikation in Boden (rot) - und Nichtbodenpunkte (gelb), im FugroViewer.

Abb. 24 zeigt einen Ausschnitt aus dem mit der FUISON Software generierten digitalen Geländemodell. Die erkennbaren Ausreisser stellen wahrscheinlich Vegetationspunkte dar, die trotz der Suche nach Bodenpunkten nicht weggefiltert wurden. Dies verdeutlicht erneut, dass bei der Filterung von terrestrischen Laserdaten sehr auf das vorliegende Gelände mit seinen topographischen Eigenschaften geachtet werden muss, damit ein möglichst genaues digitales Geländemodell generiert werden kann.

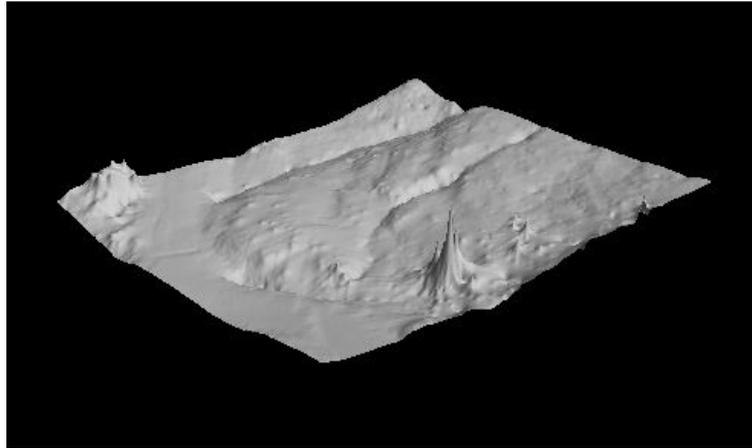


Abb. 24: Ausschnitt digitales Geländemodell auf Basis der Punktdatenfilterung mit FUISON, Ausreisser sind deutlich erkennbar.

4.1.2 Modellgenerierung

In Tab. 9 werden zusammenfassend die neu generierten digitalen Geländemodelle aufgelistet. Es handelt sich dabei um Modelle mit einer Auflösung von 20 oder 30cm, die mit verschiedenen Softwares und Methoden erstellt wurden. Für die Generierung dieser Geländemodelle wurden terrestrische Laserdaten verwendet. Sie wurden im Rahmen der Datenaufbereitung in Kacheln von 10x10m aufgeteilt und dann auf den jeweils tiefsten Z-Wert jeder Zelle ausgedünnt. Die Rastereinheit betrug dabei 0.05m. Die erwähnten methodischen Ansätze sind in Kapitel 2 meist ausführlich beschrieben und erklärt. Abb. 25 und Abb. 26 zeigen beispielhaft zwei generierte digitale Geländemodelle. Bei genauer Betrachtung können kleine Unterschiede erkannt werden. Teilweise sind beispielsweise im Geländemodell DTMa01 die Kuppenlagen deutlicher ausgeprägt als im DTMa06.

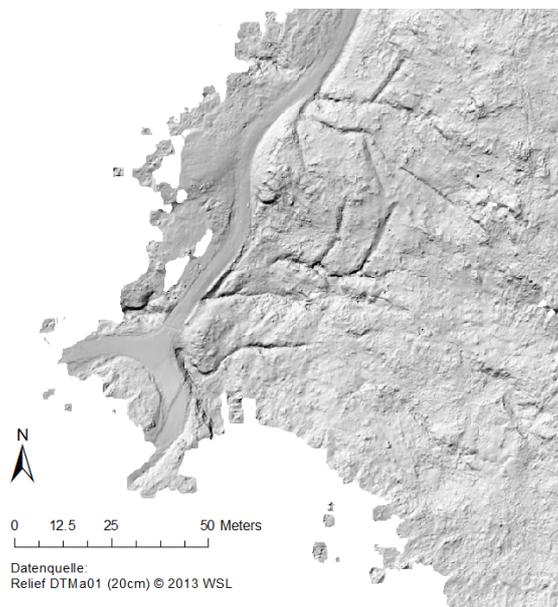


Abb. 25: Relief DTMa01 (Nr. 11).

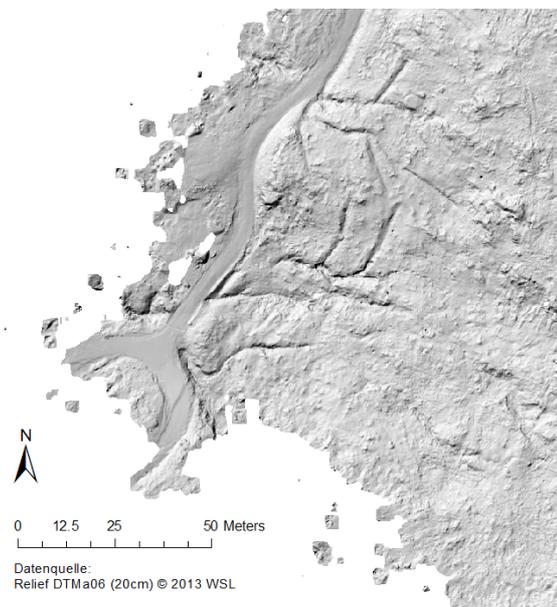


Abb. 26: Relief DTMa06 (Nr. 13).

Software	Nr.	Name	Auflösung	Filterung	Modell-generierung
<i>LasTools</i>	01	DTMi_v02_20	20cm	Standardeinstellungen	lasgrid.exe: -fill
<i>LasTools</i>	02	DTMi_v02_30	30cm		
<i>LasTools</i>	03	DTMi_v08_20	20cm	lasground.exe: -wilderness,	lasgrid.exe: -fill
<i>LasTools</i>	04	DTMi_v08_30	30cm	-ultra_fine	
<i>LasTools</i>	05	DTMi_v10_20	20cm	lasground.exe: -wilderness,	lasgrid.exe: -fill
<i>LasTools</i>	06	DTMi_v10_30	30cm	-ultra_fine, -not_airborne	
<i>LasTools</i>	07	DTM_v4_20	20cm	lasground.exe: -ultra_fine	lasgrid.exe: -fill
<i>LasTools</i>	08	DTM_v4_30	30cm		
<i>LasTools</i>	09	DTM_v6_20	20cm	lasground.exe: -wilderness	lasgrid.exe: -fill
<i>LasTools</i>	10	DTM_v6_30	30cm		
<i>LasTools</i>	11	DTM_v02_20_2	20cm	Standardeinstellungen	lasgrid.exe: -fill 10
<i>LasTools</i>	12	DTM_v02_30_2	30cm		
<i>LasTools</i>	13	DTM_v08_20_2	20cm	lasground.exe: -wild.,	lasgrid.exe: -fill 10
<i>LasTools</i>	14	DTM_v08_30_2	30cm	-ultra_fine	
<i>FUSION</i>	15	alpsur_v12_20	20cm	GroundFilter: -gparam: -1,	Standardeinstellung
<i>FUSION</i>	16	alpsur_v12_30	30cm	-wparam: 1, -tolerance: 0.01, -iterations: 20	
<i>FUSION</i>	17	alpsur_v13_20	20cm	Manuel Point Class.	Standardeinstellung
<i>FUSION</i>	18	alpsur_v13_30	30cm	(ArcGIS), LasTools (drop class 7)	

Tab. 9: Gesamte Übersicht der generierten digitalen Geländemodellen mit einer Auflösung von 20 und 30cm.

4.1.3 DTM Validierung

Für die quantitative Validierung wurde wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, das statistische Mass RMSE verwendet. Die folgende Tab. 10 zeigt die Resultate dieser Validierung. Der RMSE Wert ist in Metern angegeben und ermöglicht eine erste Aussage über die Genauigkeit des Modells. Der Fehlerwert liegt zwischen 17 und 20cm und entspricht damit der erhofften Genauigkeit. Der mittlere Höhenwert liegt bei ca. 1661m und die Abweichung bei etwa 5.7m. Ersichtlich ist, dass sich alle Geländemodelle im gleichen Wertebereich befinden und somit eine ähnliche Qualität aufweisen.

Anhand der Resultate der qualitativen (visuellen) Validierung lassen sich auch einige wertvolle Aussagen über die Qualität dieser digitalen Geländemodelle gewinnen. Die methodische Vorgehensweise dieser Validierung ist in Kapitel 2.4.3 detailliert beschrieben. Das verwendete Bewertungsschema ist in Tab. 11 aufzeigt.

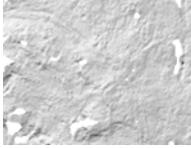
Nr.	DTM	RMSE [m]	Mittelwert [m]	Standardabweichung [m]
01	DTM_v02_20	0.172	1161.406	5.661
11	DTM_v02_20_2	0.173	1161.406	5.661
02	DTM_v02_30	0.177	1161.397	5.662
12	DTM_v02_30_2	0.177	1161.397	5.662
09	DTM_v6_20	0.177	1161.413	5.657
10	DTM_v6_30	0.178	1161.399	5.657
03	DTM_v08_20	0.179	1161.410	5.657
04	DTM_v08_30	0.179	1161.394	5.657
14	DTM_v08_30_2	0.179	1161.394	5.657
13	DTM_08_20_2	0.180	1161.410	5.657
08	DTM_v4_30	0.182	1161.396	5.672
07	DTM_v4_20	0.183	1161.410	5.673
18	alpsur_v13_30	0.206	1161.364	5.625
17	alpsur_v13_20	0.209	1161.373	5.624
06	DTM_v10_30	0.224	1161.320	5.641
15	alpsur_v12_20	0.236	1161.324	5.604
16	alpsur_v12_30	0.258	1161.279	5.587

Tab. 10: Übersicht der quantitativen Validierung ausgewählter digitaler Geländemodelle

Zum ersten Teil der visuellen Validierung lässt sich sagen, dass die Fahrspur erkennbar, jedoch meistens nicht komplett erkennbar ist. Dies wiederum ist neben der Qualität des Modells auch auf die unterschiedliche Ausprägung der Fahrspur (Tiefe der Spuren im Boden) zurückzuführen. In allen vorliegenden Ausschnitten liegt ein gewisser Detailgrad vor. Neben parallelverlaufenden Fahrspuren sind auch noch zusätzlich die spezifischen topographischen Gegebenheiten erkennbar. Die Resultate (Tab. 12) zeigen auf, dass sich im Bezug auf diesen Teil der qualitativen Validierung alle Geländemodelle in etwa im gleichen Qualitätsbereich befinden, wobei es kleine Unterschiede bezüglich der einzelnen Bewertungskriterien gibt. Geländemodell Nr. 05 weist als einziges Modell eine deutlich tiefere Qualität auf. Dieses Modell wurde wie in Tab. 9 erkennbar mit den LasTools und dem speziellen, neuen Parameter '-not_airborne' generiert und weist daher wie schon in Kapitel 4.1.1 erwähnt eine verminderte Qualität aufgrund der Fehlklassifikationen auf. Diese qualitative Validierung erwies sich als schwierig und subjektiv. Fest steht zudem, dass für eine umfangreiche und vollständige Qualitätsanalyse mehrere solcher Ausschnitte betrachtet und bewertet werden sollten.

Sichtbarkeit	
1 = sichtbar	gesamte Spur sichtbar
2 = teilweise sichtbar	nur ein/mehrere Teil(e) der Spur sichtbar
3 = nicht sichtbar	Spur nicht sichtbar
Vollständigkeit	
1 = vollständig	Spur vollständig
2 = teilweise vollständig	Spur teilweise vollständig
3 = nicht vollständig	Spur nicht vollständig
Detailgrad	
1 = sehr detailliert	Viele Details (bsp. mehrere Fahrspuren nebeneinander) vorhanden
2 = teilweise detailliert	teilweise Details vorhanden
3 = nicht detailliert	keine Details vorhanden

Tab. 11: Bewertungsschema qualitative Validierung Teil I – Verteilung der Punkte (Pts.).

Nr	DTM	Ausschnitt	Validierung			Pts.
			Sichtbarkeit	Vollständigkeit	Detailgrad	
11	DTM_v02_20_2		3	2	2	7
13	DTM_08_20_2		3	2	2	7
09	DTM_v6_20		3	2	2	7
07	DTM_v4_20		3	1	2	6
05	DTM_v10_20		2	1	1	4

Tab. 12: Exemplarische Übersicht der qualitativen Validierung ausgewählter digitaler Geländemodelle.

Im zweiten Teil der visuellen Validierung wurde die berechnete Topographie mit der im Felde bestimmten Topographie einzelner ausgewählter Bodenprofilstandorte verglichen. Tab. 13 zeigt exemplarisch zwei dieser Validierungen. Das dazugehörige methodische Vorgehen kann in Kapitel 2.4.3 gefunden werden. Obwohl es sich auch bei dieser Validierung um eine sehr subjektive Analyse der Geländemodelle handelt, können trotzdem einige Informationen über die Genauigkeit der Modelle gewonnen werden. Da die Ausprägung der markanten Topographie in dieser Arbeit von grosser Bedeutung ist und die neu generierten Geländemodelle diese möglichst realgetreu abbilden sollten, ist die Betrachtung einiger Bodenpunkte und deren topographischer Klassifikation interessant. Im Falle des ausgewählten Bodenpunktes BS602 stimmt die Topographie wie sie im Felde vermerkt wurde und auf dem Foto erkennbar ist mit derjenigen im Geländemodell überein. Oftmals ist die Klassifikation des Geländes jedoch schwierig und auch nicht eindeutig wie BS52 aufzeigt. Zusätzliche methodische Massnahmen würden wie schon in Kapitel 2.4.3 erwähnt zu einer umfassenderen und wertvolleren Analyse führen.

Nr.	BS_Nr			BS604	BS605
		Topographie gemäss BS Auswahl		Mulde	Kuppe
		Foto			
		Validierung			
02	DTM_v02_20_2	Topographie DTM Scan Foto	gemäss	Intermed.	Kuppe
		Topographie identisch		0	1
07	DTM_v6_20	Topographie DTM Scan Foto	gemäss	Intermed.	Intermed.
		Topographie identisch		0	0

Tab. 13: Exemplarischer Ausschnitt aus der qualitativen Validierung – Vergleich der Topographie DTM und Feld (Bild).

Sowohl die qualitative als auch die quantitative Validierung zeigen sehr ähnliche Ergebnisse. Aufgrund des RMSE Wertes (Werte kleiner als 0.2m) und aufgrund der Resultate der visuellen Validierung, konnten dreizehn Modelle ausgewählt werden. Dabei gilt noch zu beachten, dass sich die gesamte Validierung zu etwa 80% aus dem statistischen Mass und zu etwa 20% aus der visuellen Validierung zusammensetzt. Grund dafür ist die Tatsache, dass das Konzept der qualitativen Validierung eigenständig erstellt wurde und sehr subjektiv durchgeführt wurde. Zudem konnte jeweils nur ein kleiner Ausschnitt des gesamten Geländemodelles analysiert und validiert werden. Dennoch geben die Resultate der visuellen Validierung Auskunft über die Qualität der Modelle und unterstützen die Ergebnisse der RMSE Berechnungen.

Die besten Modelle wurden mit den LasTools generiert. Dies ist nicht sehr überraschend, da die LasTools eine grosse Palette an verschiedenen Tools und Parameter zur Verfügung stellt. Erstaunlicher ist jedoch, dass das beste Modell mit den Standardeinstellungen erstellt wurde. Aufgrund der vorliegenden terrestrischen Laserdaten sowie dem schwierigen Gelände und der Filterproblematik wäre es denkbar gewesen, dass die Auswahl der Parameter grundlegender ist und ihre Werte besser angepasst werden müssten.

Fest steht, dass alle Geländemodelle eine ähnliche Qualität aufweisen. Dies bedeutet auch, dass der Einfluss der einzelnen Modelle auf die anschliessende Modellierung wahrscheinlich nur sehr gering sein wird. Aus den vorliegenden digitalen Geländemodellen wurden anschliessend zwei Modelle (Nr. 11 und 13, beide mit einer Auflösung von 20cm) für die weiteren Modellierungen ausgewählt.

Nr.	DTM	Valid_Ausschnitt	Valid_BS	Total Pt.	Rank vis. Valid.	RMSE	Rank RMSE	Info-Methode (LasTools)
01	DTM_v02_20	7	2	9	1	0.172	1	Standardeinstellung, -fill 5
11	DTM_v02_20_2	7	2	9	1	0.173	2	Standardeinstellung, -fill 10
02	DTM_v02_30	7	1	8	2	0.177	3	Standardeinstellung, -fill 5
12	DTM_v2_30_2	6	1	7	3	0.177	3	Standardeinstellung, -fill 10
09	DTM_v6_20	7	1	8	2	0.177	3	-wilderness, -fill 5
10	DTM_v6_30	7	1	8	2	0.178	4	-wilderness, -fill 5
04	DTM_v08_30	7	1	8	2	0.179	5	-wilderness, -ultra_fine, -fill 5
14	DTM_v08_30_2	7	1	8	2	0.179	5	-wilderness, -ultra_fine, -fill 10
03	DTM_v08_20	7	0	7	3	0.179	5	-wilderness, -ultra_fine, -fill 5
13	DTM_08_20_2	7	0	7	3	0.180	6	-wilderness, -ultra_fine, -fill 10
08	DTM_v4_30	6	0	6	4	0.182	7	-ultra_fine, -fill 5
07	DTM_v4_20	6	0	6	4	0.183	8	-ultra_fine, -fill 5
05	DTM_v10_20	4	1	5	5	0.197	9	-wild., -ultra_fi. -not_airborne, -fill 5

Tab. 14: Zusammenfassende Übersicht der Modellvalidierung (dreizehn beste Modelle).

4.1.4 Zusätzliche Geländemodelle

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde die Notwendigkeit von zusätzlichen digitalen Geländemodellen mit einer anderen Auflösung deutlich. Vor allem für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden im Nachhinein zusätzliche Modelle erstellt. Tab. 15 fasst diese zusätzlichen Geländemodelle zusammen.

Es handelt sich dabei um zwei verschiedene Generierungsarten. Ersten wurden neue Modelle mit den vorgestellten Methoden erstellt, wobei bei der Interpolation des Modells die Auflösung angepasst wurde. Es handelt sich dabei um die Modelle Nr. 19 und 20, die mit den Standardeinstellungen der LasTools generiert wurden. Neu wurden Modelle mit einer Auflösung von 60 und 80cm generiert, welche gemeinsam mit den anderen Modellen zu besseren Aussagen bezüglich des Skalenbereichs führen sollen. Zweitens wurden Modelle generiert, welche basierend auf einem bestehenden Modell (Nr. 11) mit der bilinearen Option geglättet wurden (Nr. 21 und 22). Dafür wurde in ArcGIS das Tool Resampling verwendet. Es handelt sich dabei um die Modelle mit einer neuen Auflösung von 200 und 400cm. Sie sollten vor allem dazu verwendet werden, um einen Vergleich mit dem digitalen Geländemodell Swissalti3D zu ermöglichen.

Nr.	Name	Auflösung	Methode
19	DTM_v02_60_2	60cm	Standardeinstellungen <i>LasTools</i>
20	DTM_v02_80_2	80cm	Standardeinstellungen <i>LasTools</i>
21	DTM_v02_200_2	200cm	Resampling basierend auf DTM_v02_20_2 (Nr. 11)
22	DTM_v02_400_2	400cm	Resampling basierend auf DTM_v02_20_2 (Nr. 11)

Tab. 15: Übersicht über die zusätzlich generierten digitalen Geländemodelle

4.2 Bodenaciditätsmodellierung

4.2.1 Variablenselektion

Die Analyse der Korrelationsmatrizen zeigte auf, dass zwischen vielen der erklärenden Variablen und der Zielvariable pH eine erstaunlich starke Beziehung vorliegt. Für das am höchsten aufgelöste digitale Geländemodell (DTMa01, 20cm) wurde der höchste positive Korrelationskoeffizient (0.56) zwischen dem pH und der Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades (Glättung mit Radius von 12 Zellen) und der höchste negative Korrelationskoeffizienten (-0.58) zwischen dem pH und dem topographischen Positionsindex (Glättung mit Radius von 18 Zellen) festgestellt. Dies zeigt, dass bereits die Korrelationsanalyse Auskunft über die optimalsten Skalenbereiche geben kann. Diese ersten Resultate bestätigen auch schon ansatzweise die Grundhypothese, nämlich dass die Bodenacidität stark durch die topographischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet beeinflusst sind und dass eine höhere Auflösung notwendig ist.

Viele erklärende Variablen fallen durch die Resultate der Korrelationsanalysen weg, da sie eine hohe Kollinearität mit anderen Variablen aufweisen (Abb. 27). Ein Beispiel dafür ist die starke Redundanz zwischen dem topographischen Positionsindex und der Krümmung. Diese Kollinearität bezieht sich auch auf die unterschiedlichen Skalenbereiche, wonach sich auch die gleichen erklärenden Variablen gegenseitig ausschliessen können. Dies ist vor allem bei der allgemeinen Krümmung sowie der horizontalen und vertikalen Krümmung festzustellen.

Entscheidend bei der Variablenselektion war, wie in Kapitel 3.3.1 erläutert, dass die Auswahl der erklärenden Variablen zusätzlich auf der jeweiligen Korrelation zur Zielvariable beruhte. So wurden jeweils wie in Tab. 16 zu erkennen diejenigen Variablen entfernt, die einen kleineren Koeffizienten bezüglich der pH Variable aufwiesen. Beispielsweise wurde die erklärende Variable slo_a06_m18 (Slope, DTMa06, Glättung mit einem Radius von 18 Zellen) entfernt weil sie deutlich weniger stark (0.12) mit dem pH korrelierte als die Variable twi_a06_m18 (Topographischer Feuchtigkeitsindex, DTMa06, Glättung mit 18 Zellen).

Variable 1	Variable 2	Korrelation Variable 1 und 2 (absolut)	Korrelation Variable 1 und pH (absolut)	Korrelation Variable 2 und pH (absolut)
curv_a06_m9	tpi_a06_m18	0.86	0.46	0.58
curv_a06_m6	tpi_a06_m18	0.84	0.42	0.58
curv_a06_m3	tpi_a06_m12	0.83	0.41	0.54
curpro_a06_m9	tpi_a06_m18	0.80	0.36	0.58
curv_a06	tpi_a06_m3	0.86	0.23	0.29
curpro_a06	tpi_a06_m3	0.83	0.19	0.29
twi_a06_m18	slo_a06_m18	0.80	0.45	0.12

Tab. 16: Ausschnitt aus der Variablenselektion anhand der Korrelationskoeffizienten – die ausgewählten Variablen für die Modellierung sind blau markiert.

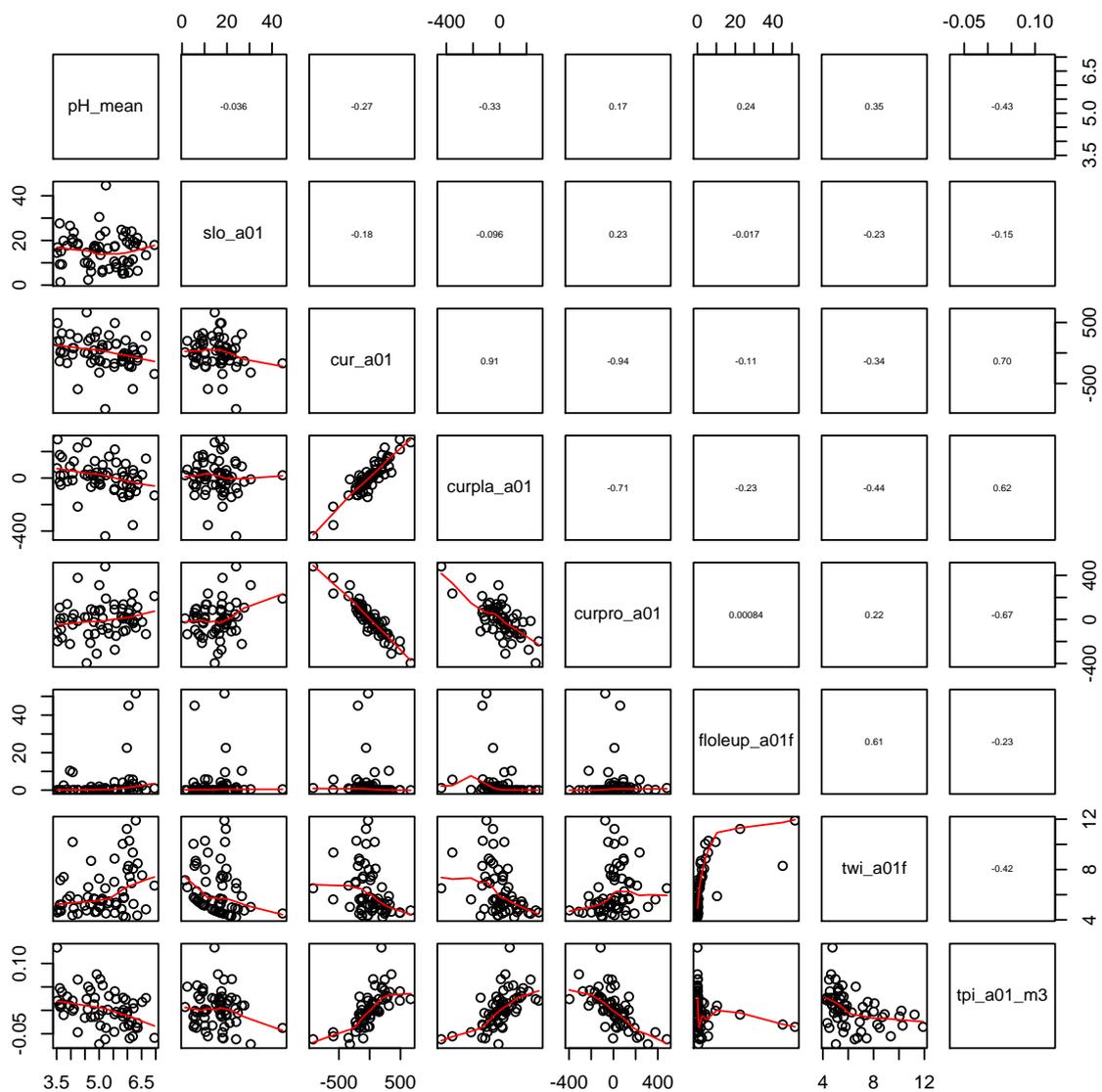


Abb. 27: Exemplarische Korrelationsmatrix – Korrelation zwischen den wichtigsten erklärenden Variablen (abgeleitet vom digitalen Geländemodell DTMa01 mit einer Auflösung von 20cm) und der abhängigen Variable pH.

4.2.2 Multiple lineare Regressionsanalyse

Tab. 18 zeigt die Resultate der Regressionsanalysen mit den verschiedenen digitalen Geländemodellen (diverse Auflösungen). Wichtig sind dabei die jeweils verwendeten erklärenden Variablen (abgeleiteten Attribute) sowie die dazugehörigen Resultate der Bestimmtheitsmasse (R^2).

Das Modell DTMa01 mit einer Auflösung von 20cm liefert im Rahmen der Regressionsanalyse das beste Resultat sowohl bezüglich der verwendeten Variablen als auch bezüglich der Bestimmtheitsmasse (siehe dazugehörige statistische Plots in Abb. 28). Das Modell weist einen BIC Wert von -40.97 sowie einen Moran's I von -0.0463 auf. Dies bedeutet, dass keine Clusterbildung sondern eine Tendenz zur Streuung vorliegt und somit keine räumliche Autokorrelation in den Modellierungen vorhanden ist. Die Modellvariabilität kann zu 54% erklärt werden (multiple R^2). Die statistischen Diagramme dieses Modells sind in Abb. 28 dargestellt und zeigen auf, dass die Modellannahmen erfüllt sind. Erstens weil die Residuen (Schätzfehler) linear

streuen (dass heisst sich auf der Geraden befinden) und kein systematischer Trend (beispielsweise Kurvenlinie) auftritt. Zweitens weil die standardisierten Residuen relativ normalverteilt sind. Drittens, weil die Varianz der Residuen homogen ist und somit keine Heteroskedastizität vorliegt. Die grössten Residuen sind Punkt 9 und 12. Und viertens, weil die Regressionskoeffizienten nicht durch einige wenige besonders einflussreiche Punkte beeinflusst werden. Alle Punkte weisen eine Hebelwirkung ≤ 0.5 auf und befinden sich somit im Toleranzbereich (Cook's Distanz) und müssen nicht speziell untersucht werden. Alle überprüften Modelle sind angemessen und entsprechen den Modellannahmen (siehe Anhang A für alle anderen Modelle).

Modellname (DTM)	Auflösung [cm]	Erklärende Variablen	Skalenbereich [cm]	Multipler R^2	Angepasster R^2
DTMa01 (11)	20	curpla_a01	20	0.540	0.516
		fileu_a01fm12	240		
		tpiflleu_a01_m12	240		
DTMa02 (20)	80	curpla_a02_m3	240	0.504	0.478
		fileu_a02_m6	480		
		tpiwi_a02_m3	240		
DTMa03 (21)	200	curpla_a03	200	0.489	0.472
		fileu_a03_m2	400		
DTMa04 (19)	60	curpla_a04_m4	240	0.516	0.491
		fileu_a04_m4	240		
		tpiflleu_a04_m6	360		
DTMa05 (22)	400	curpla_a05	400	0.178	0.165
DTMa06 (13)	20	fileu_a06_m12	240	0.504	0.478
		twi_a06	20		
		tpiflleu_a06_m12	240		
Swissalti3D (-)	200	curpla_swi2mc	200	0.199	0.158
		fileu_swi2fm2	400		
		slop_swi2_m6	1200		

Tab. 17: Übersicht über die besten Modelle mit verschiedenen Auflösungen.

Aus Tab. 17 ist jedoch auch ersichtlich, dass auch die Modelle DTMa02, DTMa04, DTMa06 die Variabilität der abhängigen Variable pH zu ca. 50% erklären können. Die Wahl der in den Modellierungen verwendeten erklärenden Variablen verhält sich bei fast allen Modellen ähnlich. Das wichtigste abgeleitete Attribut ist die Horizontalkrümmung, welches bis auf das Modell DTMa06 in allen Modellierungen als erklärende Variable vorkommt. Das hydrologische Attribut Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades kommt ebenfalls in allen Modellierungen bis auf das Modell DTMa05 vor. Grund dafür ist die Auflösung von 400cm, welche es zwar ermöglicht die Bodenacidität anhand der Horizontalkrümmung, jedoch nicht mit Hilfe von hydrologischen Attributen zu erklären. Hervorzuheben ist die Regressionsanalyse mit dem Modell Swissalti3D, welche nur knappe 16% der Modellvariabilität erklären kann. Grund für dieses schlechte Ergebnis ist die Qualität des Modells sowie die dafür verwendeten Daten. Die Resultate werden im folgenden Kapitel 5 eingehender diskutiert.

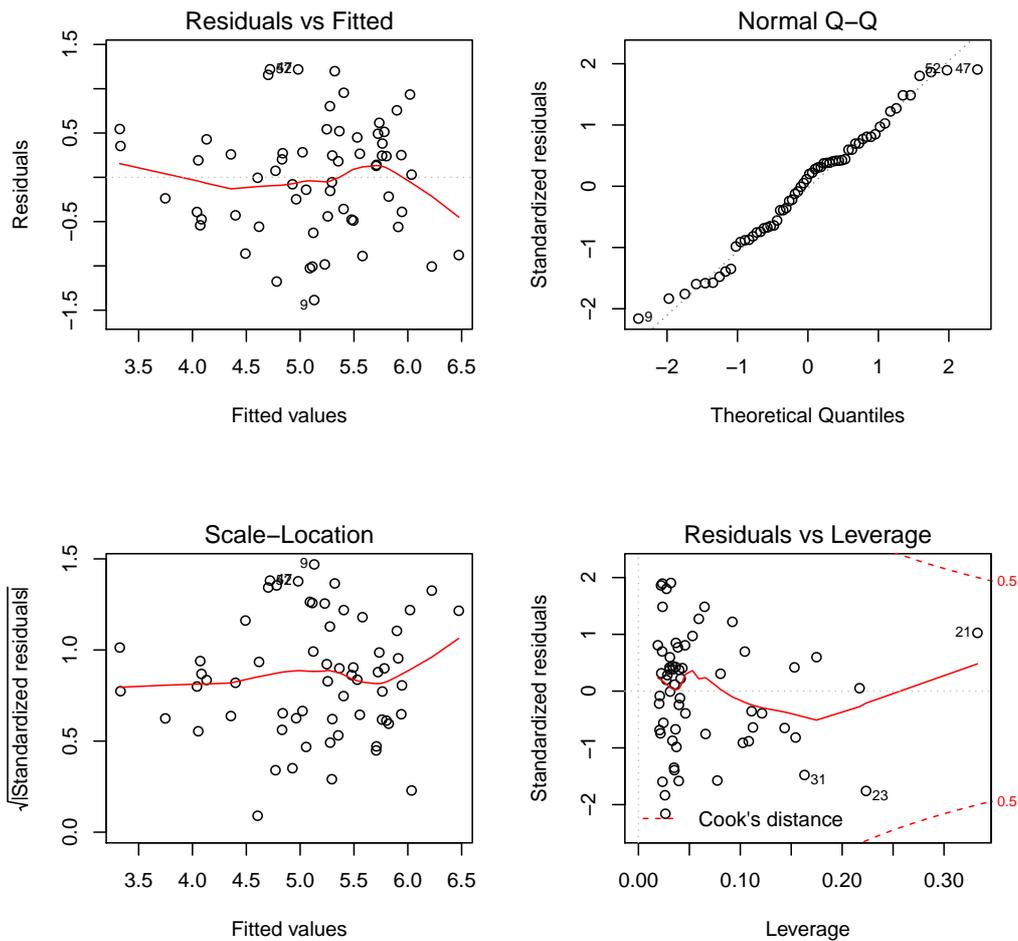


Abb. 28: Statistische Diagramme des DTMa01 (20cm).

4.2.3 Validierung der Bodenmodellierung

Die einzelnen Regressionsmodelle wurden wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben mit einer 10-fachen Kreuzvalidierung überprüft.

Das beste Modell DTMa01 (20cm) weist wie in Tab. 18 ersichtlich einen kreuzvalidierten multiplen R^2 Wert von 0.49 sowie einen kreuzvalidierten angepassten R^2 Wert von 0.47 auf. Dies bedeutet, dass bezüglich der Erklärung der Modellvariabilität keine grossen Unterschiede durch die Kreuzvalidierung auftreten (kleine Differenz zwischen den R^2 und R^2 kreuzvalidiert). Folglich handelt es sich um ein stabiles Modell.

Modellname (DTM)	Auflösung [cm]	Multipler R^2	Multipler R^2 kreuzvalidiert	Angepasster R^2	Angepasster R^2 kreuzvalidiert
DTMa01 (11)	20	0.540	0.494	0.516	0.469
DTMa02 (20)	80	0.504	0.446	0.478	0.400
DTMa03 (21)	200	0.489	0.445	0.472	0.426
DTMa04 (19)	60	0.516	0.471	0.491	0.443
DTMa05 (22)	400	0.178	0.144	0.165	0.130
DTMa06 (13)	20	0.504	0.437	0.478	0.408
Swissalti3D (-)	200	0.199	0.141	0.158	0.096

Tab. 18: Übersicht Kreuzvalidierung.

4.2.4 Vorhersage der Bodenacidität

Die kontinuierliche Vorhersage der Bodenacidität erfolgte durch die Anwendung des besten Regressionsmodelles (DTMa01), welches die Variabilität des pH zu 54% erklären konnte. Um die Vorhersage zu berechnen, wurden die erklärenden Variablen sowie die berechneten Regressionskoeffizienten in die Formel der multiplen linearen Regressionsanalyse (4) eingesetzt. Das Ergebnis ist in Abb. 29 ersichtlich. Deutlich wird, dass das lokale Mikrorelief mit den markanten Muldenlagen und somit der gegensätzliche Einfluss auf die Bodenacidität in der Vorhersage gut abgebildet wurde.

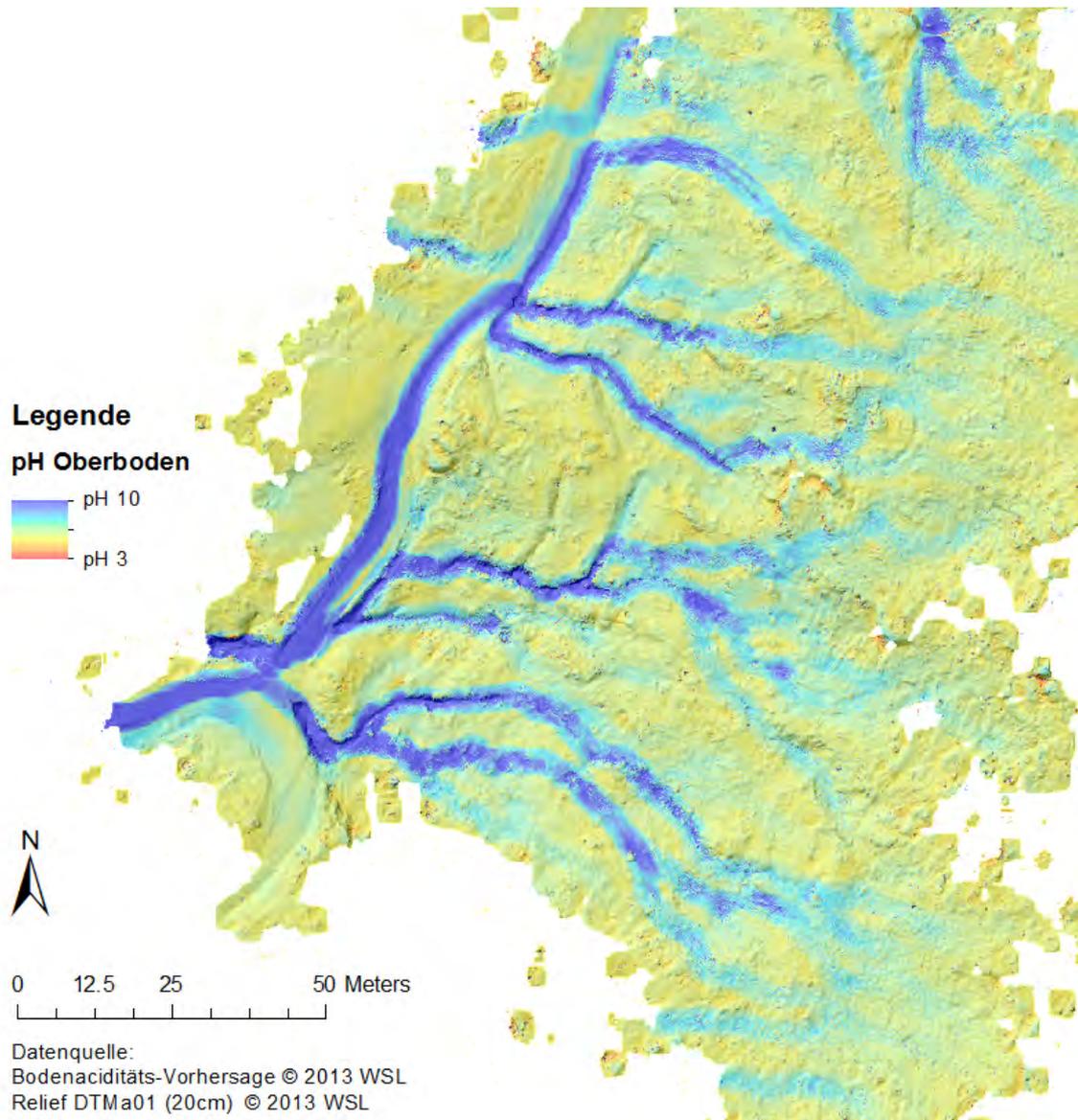


Abb. 29: Kontinuierliche pH-Vorhersage über das gesamte Untersuchungsgebiet.

5 Diskussion

Die neu generierten digitalen Geländemodelle können gemäss der Validierung (Kapitel 4.1.3) die topographischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes verhältnismässig realgetreu abbilden und stellen somit eine gute Grundlage für die Modellierung der Bodenacidität dar. Die Resultate (Kapitel 4.2) zeigten auf, dass hochaufgelöste Daten sowie die Kombination von topographischen und hydrologischen Variablen zur bestmöglichen Schätzung des pH führten. Im Folgenden werden die in Kapitel 4 präsentierten Resultate von Teil I und Teil II zusammengefasst betrachtet, hervorgehoben und im Kontext der in Kapitel 1.4 aufgestellten Fragestellungen diskutiert.

5.1 Diskussion der Fragestellungen

5.1.1 Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten

Forschungsfrage: Welche methodischen Ansätze eignen sich für die Bearbeitung der terrestrischen LiDAR Daten für das steile und dicht bewaldete Untersuchungsgebiet?

Im Rahmen des ersten Teils der Arbeit sollte herausgefunden werden, welches der beste methodische Ansatz für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten für das vorliegende Untersuchungsgebiet ist. Die Prozesskette der terrestrischen Laserdaten kann in verschiedene Bearbeitungsschritte aufgeteilt werden (Abb. 12), dabei lag der Fokus dieser Arbeit primär auf der Filterung der Punktdaten. Verschiedene Softwares stellen Tools für die Filterung von Laserdaten zur Verfügung. Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, gibt es in der Literatur eine Vielzahl an verschiedenen Methoden für die Klassifikation der Punktdaten in Boden- und Nichtbodenpunkte. Die meisten dieser Filteralgorithmen wurden jedoch primär für die Anwendung auf luftgestützte LiDAR Daten entwickelt (so wie beispielsweise FUSION/LDV). Luftgestützte Laserdaten sind meist relativ normalverteilt, wohingegen terrestrische Laserdaten sehr unregelmässig verteilt sind. Aus diesem Grund ist die Filterung der terrestrischen Punktdaten für die Generierung eines digitalen Geländemodells schwieriger (Panholzer & Prokop, 2013). Für luftgestützte Laserdaten entwickelte Filteralgorithmen eignen sich deshalb nur ansatzweise für die Bearbeitung von terrestrischen Daten, vor allem auch wenn wie in der vorliegenden Arbeit die Extraktion der Erdoberfläche mit markant ausgeprägten topographischen Merkmalen grundlegend ist. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden. Bis jetzt existieren einige wenige methodische Ansätze für die Filterung von terrestrischen Daten (Sharma et al., 2010; Panholzer & Prokop, 2013; Guarnieri et al., 2012; Pirotti et al., 2013). Die meisten dieser Filter sind jedoch nur sehr gering getestet und angewendet worden und wurden noch nicht in andere Filtermethoden integriert. Sie dienen oft als Grundlage für die Entwicklung eines kompletten Filteransatzes (Panholzer & Prokop, 2013). Es besteht deshalb wie in Kapitel 1.2.1 betont eine klare Forschungslücke im Bezug auf die Methoden für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten.

Der Bearbeitungsprozess im Rahmen dieser Arbeit sowie die neu generierten digitalen Geländemodelle und deren anschliessende Verwendung für die Modellierung der Bodenacidität konnten einige Aussagen über die Eignung verschiedener methodischer Ansätze liefern. Exemplarische Resultate (Kapitel 4.1.1) der Filterung mit verschiedenen Parametern der LasTools Software zeigten auf, dass bezüglich der Extraktion der Bodenpunkte in diesem Untersuchungsgebiet erhebliche Schwierigkeiten vorliegen. Abhängig von den gewählten Parametern für die Rastergrösse und die intensivierete Suche nach Bodenpunkten (beispielsweise '-ultra_fine') sowie den Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Klassifikationen der Punktdaten. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem die vorherrschenden Kuppen mit Heidelbeersträuchern, sowie tiefere Rinnen aber auch Totholz und Gebiete mit ausserordentlich dichter Vegetation zu Fehlklassifikationen (Tab. 8) führten. So wurden oftmals Bodenpunkte als

Nichtbodenpunkte klassifiziert. Verschiedene spezifische Parameter wie '-wilderness' und '-fine' (Kapitel 4.1) dienen neben den datenabhängigen Parametern (im Rahmen des TIN Algorithmus) deshalb der intensiven Suche nach den eigentlichen Bodenpunkten. Überraschend ist, wie die Resultate zeigten, dass nicht diese spezifischen Parameter, sondern die Standardeinstellungen (Rastergrösse gleich 5m und keine zusätzlichen Parameter für die Suche nach initialen Bodenpunkten) der LasTools zur besten Klassifikation der Punktdaten führten. Dies bedeutet in erster Linie, dass die Wahl und Festlegung von Parametern und ihren Werten für das vorliegende bewaldete Untersuchungsgebiet schwierig ist und einige spezifische Parameter (wie beispielsweise '-not_airborne') sich nicht oder noch nicht für die Verwendung auf terrestrische Daten eignen. Auch die Parameter '-fine' und '-wilderness', die sich eigentlich für die Extraktion der Bodenpunkte im bewaldeten Berggelände eignen (Hug et al., 2004), führten überraschenderweise zu falschen Klassifikationen.

Die FUSION Software bestätigt die Aussagen bezüglich der Herausforderungen der Filterung ebenfalls. Die Resultate zeigten, dass das verwendete Tool GroundFilter die Klassifikation zwar auch in schwierigen Gebieten annähernd genau vollziehen konnte, jedoch viele Ausreisser die Qualität des Modells mindern (Abb. 24). Auch hier war die Festlegung der Gewichtungparameter (wie `-gparam` und `-wparam`) im Bezug auf das Relief sehr herausfordernd. Wie die Ergebnisse zeigen, genügen selbst klein gewählte Gewichtungswerte und ein sehr kleiner Toleranzbereich verbunden mit vielen Wiederholungen (10 Iterationen) nicht um störende Vegetationspunkte und Ausreisser zu eliminieren. Dies zeigt sich auch in der anschliessenden Validierung der Geländemodelle wo die mit FUSION bearbeiteten Modelle (Nr. 15 und 16) einen Fehlerwert von mehr als 20cm aufweisen.

Für eine umfassendere Analyse dieser spezifischen Parameter müssten weitere zusätzliche Daten aus anderen Untersuchungsgebieten verwendet werden sowie die Datenaufbereitung im Vorfeld angepasst werden. Zudem sollte die Verwendung dieser Filtermethoden kritisch betrachtet werden. Die Resultate können bestätigen, dass die Fehlklassifikationen bei der FUSION Software vor allem durch die Integration von Nichtbodenpunkten und bei den LasTools durch die Entfernung von Bodenpunkten verursacht wurden. Die Qualität der neu generierten Modelle scheint dennoch in einem tolerierbaren Bereich zu liegen. Dieser liegt im Bezug auf die Genauigkeit der Erhebung der Referenzdaten beziehungsweise der Erhebung der Bodenprofile im Feld bei etwa 20cm. Klar ist auch, dass die Qualität auch von diesen Referenzdaten abhängig ist. Die dafür verwendeten Standorte der Bodenprofile befinden sich zwar auf Kuppen- beziehungsweise in Muldenlagen, sind jedoch im Rahmen des Sample Design weder in sehr markanten Topographieausprägungen wie in tiefen Rinnen noch im Umfeld sehr dichter Vegetation platziert worden. Dies bedeutet, dass anfällige Unstimmigkeiten der Erdoberfläche aufgrund von Fehlklassifikationen wahrscheinlich sind, jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht eingehender untersucht wurden und nur einen geringen Einfluss auf die Bodenmodellierungen haben. Fest steht jedoch, dass die Genauigkeit eines digitalen Geländemodells sowohl mit dem vorliegenden Gelände als auch mit der Bodenbedeckung variieren kann (Bater & Coops, 2009) und dadurch auch entscheidend beeinflusst wird (Aguilar et al., 2005).

Die Resultate der Regressionsanalysen zeigten, dass die hier vorgestellten unterschiedlichen methodischen Ansätze zwar einen erkennbaren Einfluss auf die Endergebnisse einer Modellierung haben, diese jedoch nicht sehr gross sind. Das Modell DTMa01 (LasTools Standardeinstellungen) kann gemäss dem angepassten Bestimmtheitsmass 52% der Variabilität der Bodenacidität erklären wohingegen das Modell DTMa06 (LasTools mit spezifischen Parametern für die Suche nach Bodenpunkten) 48% der Modellvariabilität erklären kann. Dennoch ist diese Differenz erstaunlich, wenn man die geringen methodischen Unterschiede bedenkt. Bis jetzt wurde in keiner bekannten Studie der Einfluss von unterschiedlichen Algorithmen zur Filterung von LiDAR Daten auf die Vorhersage von Bodeneigenschaften untersucht. Sicherlich würden intensive Analysen diesbezüglich die Entwicklung und Verbesserung von Bearbeitungsmethoden für luftgestützte und terrestrische LiDAR Daten unterstützen.

Fest steht, dass deshalb der hier verwendeten Methodik bezüglich der Filterung von terrestrischen LiDAR Daten verhältnismässig kritisch gegenübergestellt werden muss. Obwohl die Genauigkeit im Rahmen dieser Arbeit für die Modellierung der Bodeneigenschaft ansatzweise genügt ist doch klar, dass bezüglich der Filterung der terrestrischen Laserpunktdaten noch keine umfassende Methodik vorhanden ist. Gerade in Regionen mit ausgeprägtem Mikrorelief und dichter Vegetation ist die Extraktion der Bodenpunkte grundlegend. Beachtet werden muss auch, dass Objekte wie Wurzelstücke und Totholz oder eben dichte Heidelbeersträucher bedeutende Hindernisse im Filterprozess darstellen und daher speziell behandelt werden müssen. Wie in Panholzer & Prokop (2013) aufgezeigt, beweisen diese Resultate, dass herkömmliche Algorithmen nicht für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten genügen. Abb. 30 und Abb. 31 zeigen die ausgedünnten Punktdaten eines spezifischen Ausschnittes im Gelände. Es handelt sich um zwei Tannen, welche auf einer mit dichten Heidelbeersträuchern bewachsenen Kuppe stehen. Die Filterung der Laserpunkte mit spezifischen Parametern der LasTools führt zu einer deutlichen Fehlklassifikation der Kuppe.



Abb. 30: Ausschnitt ausgedünnte Punktdaten.

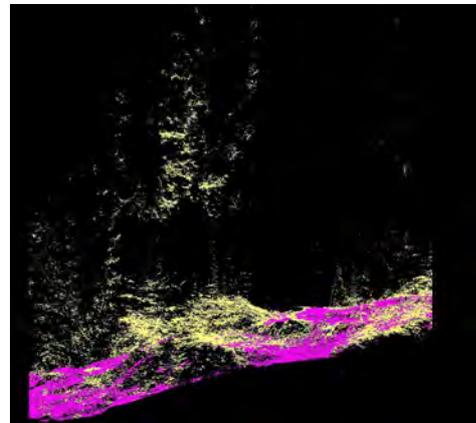


Abb. 31: Ausschnitt klassifizierte Punktdaten.

Das Aufkommen von neuen methodischen Ansätzen für die Filterung von terrestrischen Laserdaten wie beispielsweise Python TLSPy (TLSPy, 2013) zeigen, dass das Bewusstsein für die Notwendigkeit von spezifischen Softwares und Methoden vorhanden ist. Wichtig ist festzuhalten, dass Methoden zur Filterung von terrestrischen Daten alleine nicht genügen, sondern umfassende Methoden für die gesamte Prozesskette der terrestrischen LiDAR Daten bestehen müssen, um möglichst eine hohe Qualität des gewünschten Endresultates erzielen zu können. Neben der Filterung sind auch die Datenaufbereitung sowie die Modellgenerierung grundlegend. Vor allem im Bezug auf die Interpolationsmethoden stellen terrestrische LiDAR Daten eine zusätzliche Herausforderung dar (Costantino & Angelini, 2013), da sie bei grossen Variationen der Erdoberfläche einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des digitalen Geländemodells haben (Aguilar et al., 2005).

Die Frage nach den geeignetsten Methoden für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten kann somit nicht abschliessend beantwortet werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte jedoch bestätigt werden, dass die verfügbaren Softwares meist mit den Standardeinstellungen zu einer passablen Filterung der Punktdaten führen und somit verwendbare digitale Geländemodelle generiert werden können. Dabei ist entscheidend, dass die potentiellen Schwierigkeiten erkannt und in den weiteren Arbeitsprozess miteinbezogen werden. Die im Rahmen der Modellierung der Bodenacidität wichtigen Eigenschaften der Erdoberfläche konnten durch die Bearbeitung der terrestrischen LiDAR Daten mit der LasTools Software extrahiert werden und ermöglichen somit die Beschreibung des vorliegenden Phänomens.

5.1.2 Skalenbereich und Auflösung der Bodenmodellierung

Forschungsfrage: Welches ist der optimale Skalenbereich und die damit zusammenhängende optimale Auflösung um die Beziehung zwischen der Bodenacidität und der Topographie modellieren zu können?

Ein besseres Verständnis sowie quantitatives Wissen über die Skalenthematik im Kontext von Boden-Landschaftsbeziehungen ist grundlegend für zukünftige Fortschritte der digitalen Bodenkartierung (Cavazzi et al., 2013; Pennock & Veldkamp, 2006). Eine umfassende Skalendiskussion ist auch im Bezug auf die stetigen Entwicklungen bezüglich der Technologien für die Datenerfassung sowie den Methoden der digitalen Bodenkartierung von grossem Interesse (Thompson et al., 2001). Die Wahl des optimalen Skalenbereichs sowie der optimalen Auflösung für eine spezifische Bodenmodellierung beeinflussen sowohl die Analysen als auch die Resultate stark. Im Bezug auf die Modellierung von Bodeneigenschaften sind Skala und Auflösung primär von den Prozessen, welche die vorliegende Pedogenese beeinflussen und somit vom Untersuchungsgebiet sowie vom gesamten Forschungskontext abhängig (Corstanje et al., 2008; Cavazzi et al., 2013). Da die Umwelt mit ihren Phänomenen und Prozessen nicht in ihrer gesamten Komplexität untersucht, modelliert und visualisiert werden kann (Cavazzi et al., 2013), ist eine eingehende Analyse des optimalen Skalenbereichs sowie der passenden Auflösung grundlegend für die Gewinnung von umfassenden räumlichen Bodeninformationen. Obwohl der Einfluss des Skalenbereichs und der Auflösung im Kontext der Bodenkunde schon in verschiedenen Studien aufgegriffen und beschrieben wurde (Smith et al., 2006; Behrens et al., 2010; Cavazzi et al., 2013), wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, dem hochkomplexen Konzept der Skala auf den Grund zu gehen um wertvolle Aussagen über deren Stellenwert im Bezug auf die Modellierung von Bodeneigenschaften zu gewinnen. Die vorliegenden Resultate ergänzen und bestätigen die in verschiedenen Studien vorgestellten Annahmen und Hypothesen.

Wie die Ergebnisse der schrittweisen Regressionen zeigten, wurden für die Modellierung der Bodenacidität in den meisten Modellen die gleichen erklärenden Variablen verwendet. Entscheidend ist dabei, dass es sich je nach Attribut um unterschiedliche Skalenbereiche handelt. Die wichtigsten Attribute sind die Horizontalkrümmung sowie die Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades, wobei die Horizontalkrümmung in einem Skalenbereich zwischen 20-240cm und die Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades im Skalenbereich zwischen 240-480cm einflussgebend ist. Von Bedeutung ist, dass die horizontale Krümmung bis auf zwei Modelle im jeweils kleinsten verfügbaren Skalenbereich verwendet wurde. Im DTMa01 hat die Horizontalkrümmung beispielsweise im Skalenbereich von 20cm das grösste Schätzungspotential. Dies zeigt, dass wie in Thompson et al. (2001) und in Cavazzi et al. (2013) festgehalten, gerade für die Beschreibung von komplexen topographischen Ausprägungen kleine Skalenbereiche notwendig sind. Dies verdeutlicht, dass vor allem für die Pedogenese und die Beschreibung von Bodeneigenschaften die topographischen Gegebenheiten entscheidend sind (Jenny, 1941; Muñoz & Kravchenko, 2012; McBratney et al., 2003) und die Wahl des optimalen Skalenbereichs deshalb auch sehr wichtig ist (Barneveld et al., 2013). Des Weiteren interessant ist, dass das hydrologische Attribut bis auf eine Ausnahme (DTMa04) immer in einem grösseren Skalenbereich als die Krümmung verwendet wurde. Wie auch von Muñoz & Kravchenko (2012) beobachtet, liegt die Aussagekraft von hydrologischen Variablen demnach in einem deutlich grösseren Skalenbereich als bei den topographischen Variablen. Dies weil sich die hydrologischen Gegebenheiten im vorliegenden Untersuchungsgebiet über den gesamten Hang erstrecken und durch ein grösseres Einzugsgebiet charakterisiert werden und daher die Abflussprozesse auf einer grossräumlicheren Skala stattfinden.

Die Rolle der Interaktionsvariablen ist im Rahmen dieser Modellierungen bedeutend. Die Kombination von topographischen und hydrologischen Attributen erwies sich als entscheidend für eine gute Schätzung der Bodenacidität. In vier von sieben Modellierungen wurden Interaktions-

variablen verwendet. Dabei handelt es sich meistens um eine Interaktion zwischen dem Topographischen Positionsindex und einem hydrologischen Attribut im Skalenbereich von 240cm. In dieser Kombination werden die benötigten Informationen über die topographischen Gegebenheiten wie die ausgeprägten Kuppen- und Muldenlagen sowie die hydrologischen Eigenschaften wie Abfluss und Feuchtigkeit zusammengefasst. Die für die einzelnen Modellierungen verwendeten erklärenden Variablen bestätigen zudem die Annahme, dass wie auch in Behrens et al. (2010) für eine detaillierte Vorhersage jeweils nur eine kleine Anzahl an Variablen notwendig ist, diese jedoch nur in ihrem spezifischen Skalenbereich aussagekräftig sein können.

Überraschend ist, dass erklärende Variablen wie die Hangneigung oder die Exposition nicht ausschlaggebend für die Schätzung der Bodenacidität waren. Dafür die horizontale Krümmung, welche ja auch explizit die Neigung sowie die Exposition des Geländes verdeutlicht. Die physikalische Bedeutung der horizontalen Krümmung sowie des Topographischen Feuchtigkeitsindexes für die Bodenacidität wird in Abb. 32 und Abb. 33 aufgezeigt. Erkennbar ist, dass die Horizontalkrümmung die spezifischen Kuppen- und Muldenlagen gut darstellt und somit das ausgeprägte Mikorelief aufzeigt. Das hydrologische Attribut verdeutlicht ebenfalls die Topographie und zeigt die Standorte der vernässen Mulden auf.

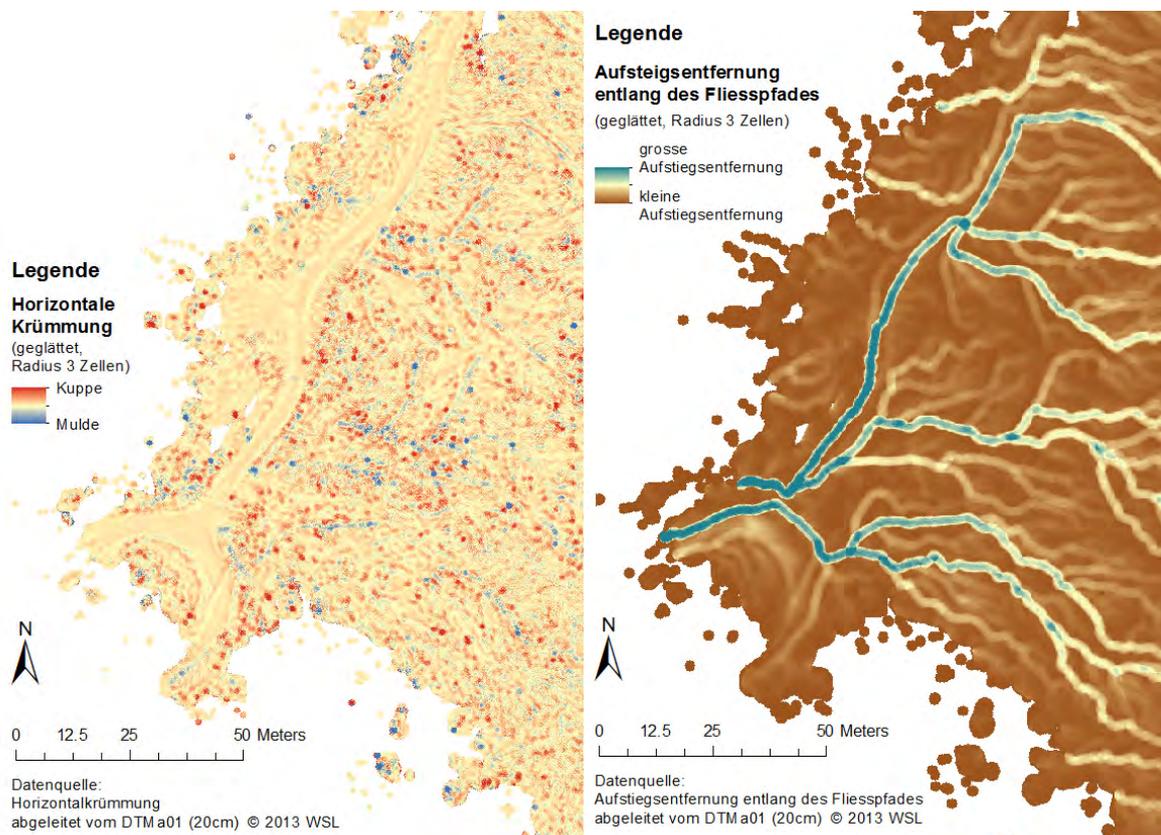


Abb. 32: Horizontalkrümmung.

Abb. 33: Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades.

Die Modellierung mit dem am höchsten aufgelösten digitalen Geländemodell (DTMa01) lieferte das beste Resultat bezüglich des angepassten Bestimmtheitsmasses. Mit einer Auflösung von 20cm konnte 52% der Modellvariabilität erklärt werden. Obwohl auch mit Auflösungen von 60 und 80cm zwischen 48 und 49% der Variabilität erklärt werden konnte, nimmt das Erklärungspotential wie in Abb. 34 ersichtlich mit grösseren Auflösungen ab. So konnte bei einer Auflösung von 400cm nur noch etwa 17% der Modellvariabilität erklärt werden. Dennoch ist auch er-

sichtlich, dass für kleine Verbesserungen des Erklärungspotentials stetig mehr Daten benötigt werden um die hochaufgelösten Geländemodelle zu generieren. Erst ab einer gewissen Auflösung (nach 200cm) nimmt die Qualität des Erklärungspotentials deutlich ab. Verdeutlicht wird auch, dass das Erklärungspotential des Swisssalti3D Geländemodells (200cm Auflösung) wesentlich geringer ist als jenes der terrestrischen Modelle. Dies ist primär auf die Qualität und somit die Erhebungsart (luftgestütztes LiDAR) zurückzuführen.

Es stellt sich nun die Frage ob noch höhere Auflösungen als 20cm zu einem noch besseren Resultat führen könnten. Die Generierung von digitalen Geländemodellen mit Auflösungen von 5 und 10cm mit den terrestrischen Laserdaten und der LasTools Software zeigte jedoch auf, dass bei noch höheren Auflösungen die Filterproblematik verstärkt wird und die Genauigkeit aufgrund von Rauschen verringert wird. Methodisch gesehen macht es deshalb keinen Sinn mit noch höheren Auflösungen zu arbeiten. Fest steht, dass hochaufgelöste digitale Geländemodelle viel Potential für die Modellierung von Bodeneigenschaften bieten. Und dass sie entgegen den Resultaten in der Studie von Cavazzi et al. (2013) unabdingbar für die genaue Modellierung von Bodeneigenschaften sind.

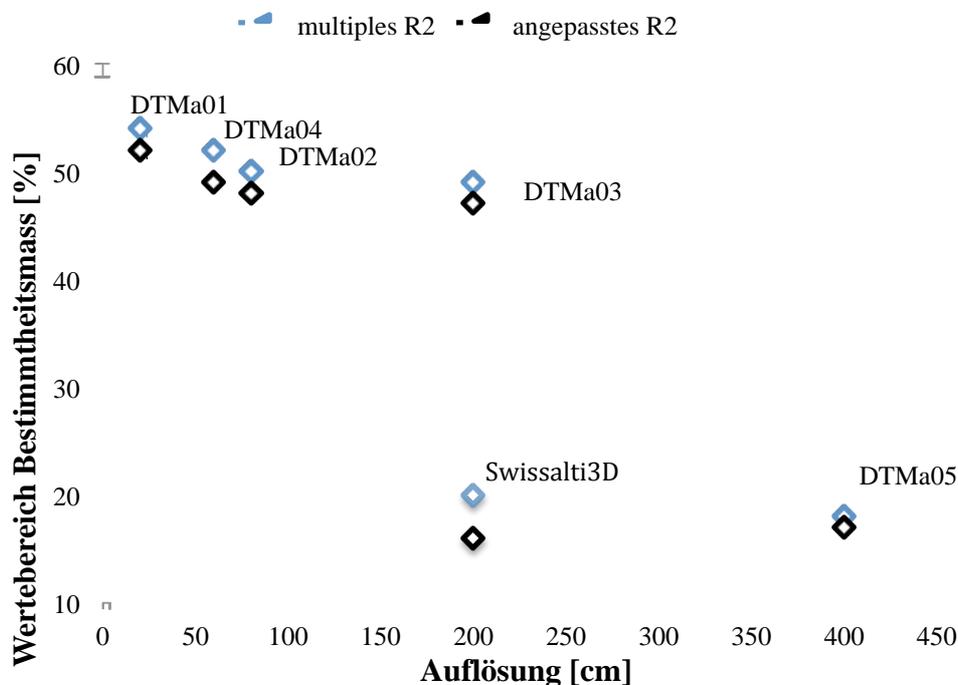


Abb. 34: Resultate (Bestimmtheitsmasse) der Bodenaciditätsmodellierung mit verschiedenen Auflösungen.

In dieser Arbeit konnte, wie auch schon in anderen Studien aufgezeigt werden, dass Boden-Landschaftsbeziehungen in unterschiedlichen Skalenbereichen variieren und dass deshalb die verschiedenen Attribute (Park & Vlek, 2002; Smith et al., 2006) nur in einem gewissen Skalenbereich ihr höchstes Schätzungspotential aufweisen (Behrens et al., 2010; Muñoz & Kravchenko, 2012). Für die Modellierung der Bodenacidität sind topographische und hydrologische Attribute in verschiedenen kleinen Skalenbereichen sowie hochaufgelöste digitale Geländemodelle notwendig. Damit kann bewiesen werden, dass das im Untersuchungsgebiet vorherrschende stark ausgeprägte Mikrorelief einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenacidität hat, welche dann zu gegensätzlichen Bedingungen auf Kuppen- und Muldenlagen führt.

5.1.3 Mehrwert der terrestrischen LiDAR Daten für Bodenmodellierungen

Forschungsfrage: In wie weit ergibt sich aus der Verwendung von terrestrischen LiDAR Daten ein Mehrwert für die Modellierung von Bodeneigenschaften im kleinräumlichen Kontext?

Terrestrische LiDAR Systeme werden jüngst in vielen Studien für die 3D Datenerfassung vorgeschlagen und verwendet (siehe Kapitel 1.2.1). Sie ermöglichen eine einfache Planung, Organisation und Durchführung der Datengewinnung (Abellán et al., 2014) und liefern detaillierte Informationen über kleinräumliche Objekte und Prozesse in Form von hochaufgelösten und genauen 3D Punktdaten (Dassot et al., 2011; Lim et al., 2013). Dabei bieten sie vor allem bei Untersuchungen in bewaldeten Gebieten wie beispielsweise für die Erfassung von Wald- und Vegetationsstrukturen umfangreichere Möglichkeiten im Gegensatz zu luftgestützten LiDAR Systemen (Dassot et al., 2011; Lim et al., 2013; Liang et al., 2014).

Bis anhin ist sehr wenig über die Eignung von terrestrischen Laserdaten für digitale Bodenmodellierungen bekannt (Barneveld et al., 2013; Prentice, 2014). Im Rahmen dieser Arbeit sollten deshalb Aussagen über den Mehrwert von terrestrischen LiDAR Daten für Modellierungen von Bodeneigenschaften im kleinräumlichen Kontext gewonnen werden. Dafür wurde das digitale Geländemodell Swissalti3D als Vergleichsmodell in die Regressionsanalysen miteinbezogen. Die vorliegenden Resultate zeigten auf, dass die verwendeten terrestrischen Laserdaten des DTMa03 (200cm Auflösung) in verschiedenen Aspekten einen deutlichen Mehrwert gegenüber den luftgestützten Laserdaten des Swissalti3D Modelles (200cm Auflösung) aufweisen. Die luftgestützten Laserdaten genügen nicht, um die topographischen Merkmale des Untersuchungsgebietes realgetreu abzubilden. Ein Vergleich in Abb. 35 zwischen dem abgeleiteten Topographischen Positionsindex des DTMa03 sowie des Swissalti3D zeigt auf, dass hochqualitative Daten notwendig sind, um die charakteristischen Reliefeinheiten auf der Untersuchungsfläche im Alptal darzustellen. Deutlich wird, wie auch schon in Thompson et al. (2001) aufgezeigt, dass mit einer Auflösung im grösseren Skalenbereich und mit der Qualität des digitalen Geländemodelles das vorliegende Relief geglättet wird und somit die kleinräumliche Geomorphologie nicht mehr realgetreu abgebildet werden kann.

Mit den terrestrischen Laserdaten konnten mit einer Auflösung von 200cm somit die spezifischen topographischen Gegebenheiten sowie auch andere Attribute wie die Krümmung und hydrologische Eigenschaften viel realgetreuer abgebildet werden. Grundlegend ist dabei vor allem die Punktdichte, welche bei der Datenerfassung mit terrestrischen LiDAR Systemen deutlich höher liegt als bei luftgestützten Systemen, die Datenqualität und die verbesserte Möglichkeit die Erdoberfläche zu erfassen, da sich der terrestrische Laserscanner in Bodennähe befindet (Panholzer & Prokop, 2013). Die Resultate der Regressionsanalysen mit diesen beiden Modellen bestätigen diese Aussagen. Bezüglich der erklärenden Variablen werden in beiden Modellen etwa die gleichen Attribute verwendet. Sowohl beim DTMa03 sowie beim Swissalti3D wurde die Horizontalkrümmung im jeweils kleinsten verfügbaren Skalenbereich (200cm) sowie das hydrologische Attribut Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades in einem grösseren Skalenbereich (400cm) verwendet. Dies bestätigt wiederum die Annahme, dass für die Modellierung der Bodenacidität die topographischen Gegebenheiten im kleinsten Skalenbereich benötigt werden (Kapitel 5.1.2). Vergleicht man aber die Werte des angepassten Bestimmtheitsmasses, zeigt sich das die terrestrischen Laserdaten ein deutlich besseres Resultat liefern. Mit ihnen konnte 47% der Variabilität der abhängigen Variable pH erklärt werden, wohingegen mit dem Swissalti3D Modell nur knappe 16% erklärt werden konnte (siehe Abb. 34).

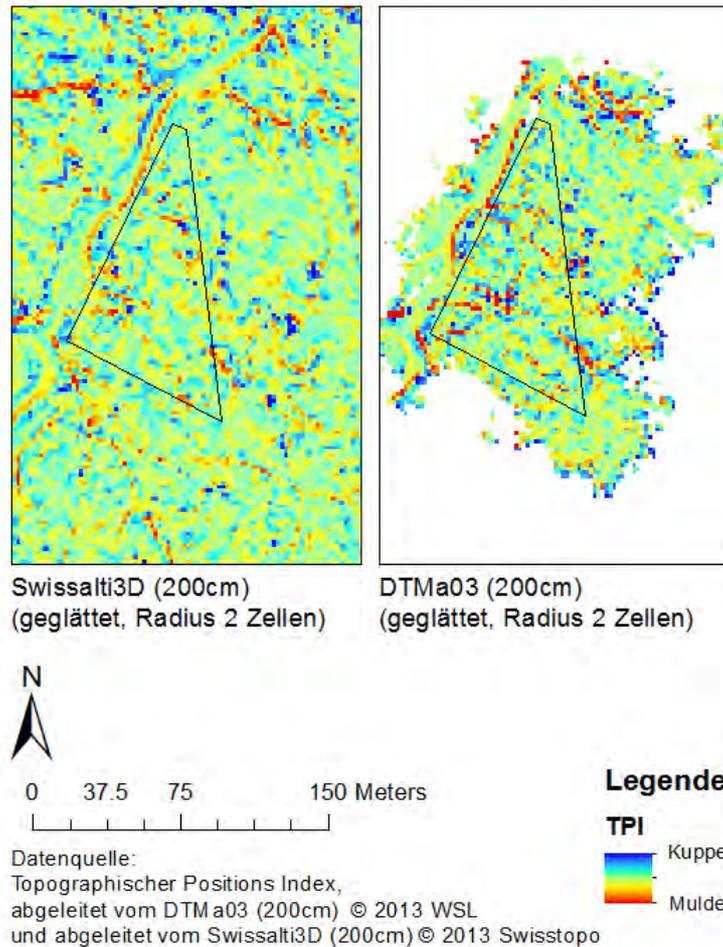


Abb. 35: Vergleich TPI (geglättet mit Radius 2 Zellen) zwischen dem Geländemodell Swissalti3D und dem neu generierten DTMa03 (beide mit einer Auflösung von 200cm).

Diese Resultate sind wie bereits erwähnt stark von den Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet abhängig und repräsentieren eine einzige Fallstudie. Für eine umfassendere Aussage bezüglich des Mehrwertes von terrestrischen Laserdaten im Vergleich zu luftgestützten Daten empfiehlt sich daher eine detailliertere Analyse mit Vergleichen zu anderen Geländemodellen und anderen Untersuchungsflächen in Flyschregionen der Schweiz. Eine aufschlussreiche Analyse würde sicher ein Vergleich mit dem neu generierten digitalen Geländemodell des Kantons Bern ergeben, dessen Daten mit einem luftgestützten LiDAR erfasst wurden und welches eine Auflösung von 50cm aufweist (Geoportal Kanton Bern, 2014).

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen, dass hochaufgelöste terrestrische LiDAR Daten notwendig für Modellierungen im Rahmen der digitalen Bodenkartierung sind. Abhängig vom gewünschten Skalenbereich, dem Verwendungszweck der Daten sowie dem Forschungsziel bieten terrestrische Laserdaten gerade für die Anwendungen in bewaldeten Gebieten mit ausgeprägten topographischen Gegebenheiten einen deutlichen Mehrwert mit verschiedenen Aspekten. Umfassende Vorteile wie in jüngsten Studien beschrieben, konnten bestätigt werden:

- Bereitstellung von umfangreichen und genauen 3D-Daten mit hoher Auflösung (Dassot et al., 2011; Loudermilk et al., 2007)
- Datengewinnung in schwierigen und relativ grossen Gebieten und über komplexe Sachverhalte (Dassot et al., 2011; Sharma et al., 2010)

- Schnellere, detailliertere und kosteneffizientere Datengewinnung im Vergleich zu anderen Methoden (Dassot et al., 2011; Lim et al., 2013)
- Möglichkeit einer relativ einfachen Planung sowie einem schnellen Aufbau und einer leichten Datenerfassung (Abellán et al., 2014)
- Zukünftiges Potential um Messungen in verschiedenen Bereichen zu verbessern und messtechnische Schwierigkeiten zu überwinden (Dassot et al., 2011)

5.2 Bodenacidität im Untersuchungsgebiet

Durch die kontinuierliche Vorhersage des pH im Oberboden auf der Untersuchungsfläche im Alptal konnte das ausgeprägte Mikrorelief verhältnismässig realgetreu abgebildet werden.

Wie Abb. 36 zeigt, wurden vor allem die markanten Mulden und somit das Abflussnetz deutlich durch die Vorhersage hervorgehoben. Ersichtlich ist, dass wie durch die Grundhypothese erwartet der pH in den Mulden im basischen Bereich liegt. Vor allem aufgrund des hohen Niederschlages im Untersuchungsgebiet und durch die stetigen Rutschungen kommt es zu Vernässungen in den Muldenlagen. Tendenziell befindet sich deshalb die gesamte Untersuchungsfläche wie die Karte zeigt eher im basischen pH-Bereich (blau). Die dazwischenliegenden Rücken und intermediären Gebiete heben sich jedoch bezüglich des pH-Wertes deutlich von den Werten in den Mulden ab. Vereinzelt sind ausgeprägte Kuppenlagen mit einem deutlichen sauren pH-Wert erkennbar. Auf der Vorhersagekarte ist der Zusammenhang zwischen den vorhergesagten und den gemessenen pH-Werten schön erkennbar. Auch hier erkennt man, dass tendenziell die Vorhersagen in Muldenlagen näher am gemessenen Wert liegen als die von Kuppenlagen. Einige Vorhersagen stimmen jedoch mit den gemessenen Werten auf Kuppenlagen überein (rot, saure pH-Werte).

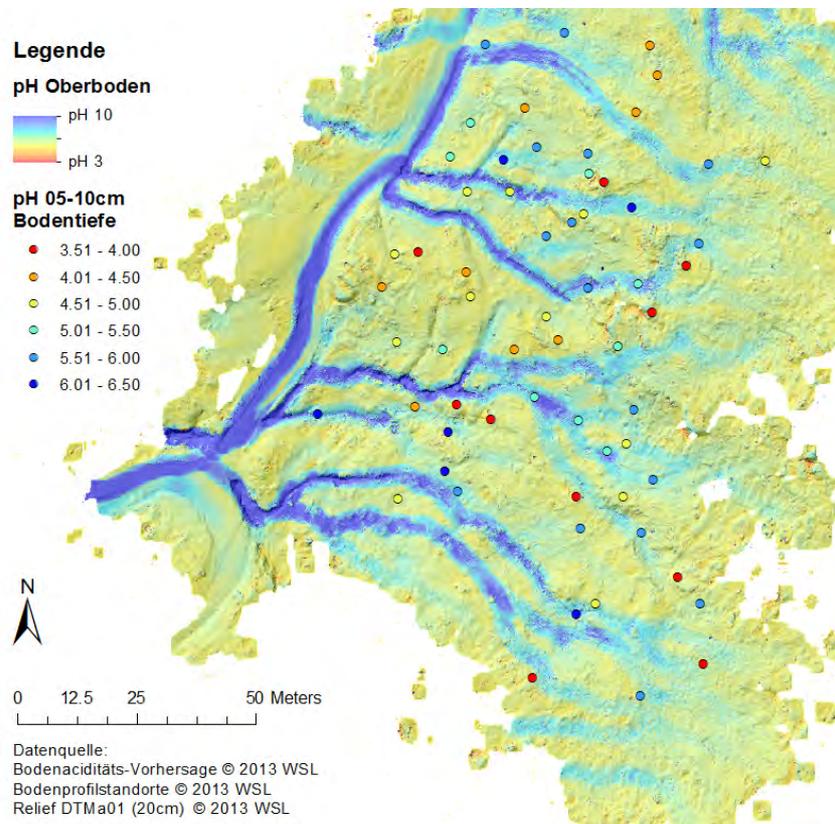


Abb. 36: Bodenaciditätskarte – kontinuierliche pH-Vorhersage mit gemessenen Boden-pH Daten der Profilstandorte.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

6.1 Erreichtes

Diese Masterarbeit beinhaltete einen vielseitigen und teilweise herausfordernden Arbeitsprozess. Im ersten Teil der Arbeit wurde folgendes erreicht:

- Generierung von digitalen Geländemodellen unterschiedlicher Auflösung aus terrestrischen Laserpunktdaten mit zwei verschiedenen methodischen Ansätzen.
- Möglichst realgetreue Abbildung der markanten Geländetopographie durch intensives Austesten von verschiedenen Filterparametern.
- Berechnung von diversen erklärenden Variablen, welche vor allem die topographischen und hydrologischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes charakterisieren.
- Abdeckung von unterschiedlichen Skalenbereichen durch die Glättung dieser abgeleiteten Attribute mit verschiedenen Nachbarschaftsgrößen.

Im zweiten Teil der Arbeit konnte folgendes erreicht werden:

- Multiple lineare Regressionsanalysen für jedes der unterschiedlich aufgelösten digitalen Geländemodelle mit den jeweiligen abgeleiteten Attributen als Basis.
- Identifikation der aussagekräftigsten erklärenden Variablen für die Modellierung der Bodenacidität durch Korrelationsanalysen und schrittweise Variablenselektionen.
- Erklärung der Modellvariabilität zu durchschnittlich 50%.
- Kontinuierliche Schätzung der Bodenacidität über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Im Verlauf dieser Arbeit konnte viel erreicht werden! Das lokale Phänomen im Untersuchungsgebiet mit dem ausgeprägten Mikrorelief konnte beschrieben und die Grundhypothese, dass die Topographie der entscheidende Einflussfaktor auf die Bodenacidität ist, bestätigt werden. Somit stellten die erreichten Produkte dieser Arbeit eine gute Grundlage für die Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen dar.

6.2 Erkenntnisse

Basierend auf den soeben aufgestellten erreichten Produkten im Rahmen des intensiven Arbeitsprozesses konnten in dieser Arbeit verschiedene wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Im Folgenden sind einige der wichtigsten Erkenntnisse aus beiden Teilen der Arbeit aufgelistet:

- Terrestrische LiDAR Daten ermöglichen die Generierung von hochaufgelösten und hochqualitativen digitalen Geländemodellen.
- Terrestrische LiDAR Daten besitzen gegenüber luftgestützten Laserdaten einen deutlichen Mehrwert im Bezug auf die Modellierung von Bodeneigenschaften.
- Es gibt sehr wenige implementierte methodische Ansätze für die Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten.
- Gerade die Filterung der terrestrischen Punktdaten ist im steilen und dicht bewaldeten Gebiet mit Schwierigkeiten behaftet, dabei ist vor allem die Auswahl und Festlegung der verschiedenen Parameter schwierig.
- Die Qualität der terrestrischen LiDAR Daten ist entscheidend für die anschließende Modellierung von Bodeneigenschaften.
- Die Methode der multiplen linearen Regression bietet viel Potential für die spezifische Modellierung von Bodeneigenschaften.
- Die optimale Auswahl der erklärenden Variablen kann nur in Kombination mit fachkundlichem Hintergrundwissen erfolgen.
- Die topographischen Gegebenheiten haben in diesem Untersuchungsgebiet einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenacidität.
- Zu den relevantesten erklärenden Variablen für die Beschreibung der Bodenacidität gehören die Horizontalkrümmung und die Aufstiegsentfernung entlang des Fliesspfades.

- Zusätzliche Interaktionsvariablen haben einen überraschend grossen Einfluss auf die Modellierung des Boden-pH im Oberboden.
- Die topographischen Charakteristiken haben im jeweils kleinsten Skalenbereich und die hydrologischen Eigenschaften immer in einem grösseren Skalenbereich den bedeutendsten Einfluss auf die Bodenaciditätsmodellierung.
- Hochaufgelöste und genaue Geländedaten sind im vorliegenden Untersuchungsgebiet absolut notwendig für die Modellierung der Bodenacidität.

Weit darüber hinaus konnten wertvolle Hinweise und im Bezug auf Notwendigkeiten und Herausforderungen für zukünftige Forschungen im Bereich der Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten sowie der digitalen Bodenkartierung gewonnen werden. Die vorliegenden Resultate und Erkenntnisse liefern eine umfassende Grundlage für zukünftige Erhebungen von detaillierten, hochaufgelösten und räumlichen Bodeninformationen sowie für die Vorhersagemöglichkeit von Bodeneigenschaften in anderen Flyschregionen der Schweiz.

6.3 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Bodenacidität auf der Untersuchungsfläche im Alptal auf Basis von terrestrischen LiDAR Daten erfolgreich modelliert werden. Um jedoch umfassendere Aussagen bezüglich den gestellten Forschungsfragen sowie dem gesamten Modellierungskontext zu gewinnen, müssten diese Untersuchungen in anderen Flyschregionen der Schweiz wiederholt werden. Dies ist vor allem wichtig, um die Ziele im Kontext des Projektes „Kartierung von Bodeneigenschaften zur Beurteilung von Bodenfunktionen auf regionaler Skala“ zu verfolgen und um flächendeckende sowie detaillierte Bodeninformationen zu generieren.

Für die Modellierung von Bodeneigenschaften ist die Qualität der Geländedaten absolut grundlegend. Aus diesem Grund ist bezüglich der Verwendung von terrestrischen LiDAR Daten im Rahmen der digitalen Bodenkartierung eine vertiefte Analyse der möglichen Bearbeitungsverfahren nötig. Eine grosse Hürde wird dabei die Verbesserung der Filteralgorithmen sein, denn es stellt sich die Frage, wie die Parameter der einzelnen Filteralgorithmen festgelegt werden müssten, um ein möglichst realgetreues Abbild der Erdoberfläche zu generieren und wie dieser Arbeitsprozess bezüglich des Zeitaufwandes effizienter gestaltet werden könnte. Dabei wird sich auch immer wieder die Frage stellen, ob beispielsweise Totholz zur eigentlichen baren Erdoberfläche gezählt werden kann und wie die Filteralgorithmen mit störenden Objekten oder markanter Geländemorphologie umgehen sollen. Fest steht, dass zukünftige Weiterentwicklungen von spezifischen Methoden und Algorithmen zur Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten unabdingbar sind (Panholzer & Prokop, 2013). Im Bezug auf die Generierung von hochaufgelösten digitalen Geländemodellen sollte zudem ein Fokus auf der verwendeten Interpolationsmethode liegen, denn der Einfluss der Interpolation auf die Modellierung darf gerade in Gebieten mit markanter Geländemorphologie nicht unterschätzt werden. Durch die Analyse von unterschiedlichen Interpolationsmethoden könnte die Qualität der Geländemodelle optimiert werden (Aguilar et al., 2005). Die terrestrischen LiDAR Systeme stellen eine wertvolle Datenquelle für die Analyse, Modellierung und Visualisierung von hochkomplexen Phänomenen und Prozessen auf kleinräumlicher Skala dar. Auch in jüngsten Studien wird der Mehrwert dieser Daten belegt und hervorgehoben (Abellán et al., 2014). Viele aktuelle Projekte, wie beispielsweise die Entwicklung eines persönlichen Laserscanners (PLS) (Liang et al., 2014) zeigen, dass die terrestrische Lasertechnologie zunehmend ein fester Bestandteil von Forschungsanalysen in verschiedenen naturwissenschaftlichen Bereichen ist.

Die verwendete Methode der multiplen linearen Regression beinhaltet viel Potential für die Modellierung von Bodeneigenschaften. Dennoch ist es für eine verbesserte Modellierung sicherlich notwendig, auch noch andere Methoden wie beispielsweise die geographisch gewichtete Regression (GWR) anzuwenden (Backhaus et al., 2006). Zudem wäre es von grossem Interesse, zusätzlich zur Bodenacidität auch noch andere wichtige Bodeneigenschaften wie zum

Beispiel die Bodentiefe zu modellieren um so umfassendere Bodeninformationen von Flyschgebieten zu gewinnen. Die Skalenfrage wurde jüngst in verschiedene Studien im Zusammenhang mit der digitalen Bodenkartierung diskutiert (Barneveld et al., 2013; Cavazzi et al., 2013) und wird sicherlich auch in Zukunft Bestandteil der Forschungen sein. Die vorliegenden Resultate haben gezeigt, dass die optimale Wahl des Skalenbereiches sowie der Auflösung entscheidend für die Modellierung von Bodeneigenschaften ist. Aus diesem Grund sollten sich weitere Analysen intensiv mit der Frage beschäftigen, wie der Skalenbereich und die Auflösung im Rahmen einer Modellierung schon im Voraus eingegrenzt und bestimmt werden kann.

Die Resultate und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit haben aufgezeigt, dass vor allem bezüglich der Skalendiskussion, aber auch im Bezug auf die Verwendung und Bearbeitung von terrestrischen LiDAR Daten viel Potential für Verbesserung von Modellierungen im Kontext der digitalen Bodenkartierung besteht. Zudem sind jedoch auch intensive Analysen und Weiterentwicklungen notwendig um diese Verbesserungen in Zukunft zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M. & Lato, M. J. (2014): Terrestrial Laser Scanning of Rock Slope Instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 80-97.
- Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M.A. & Carvajal, F. (2005): Effects of Terrain Morphology and Sampling and Density and Interpolation Methods on Grid. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(7): 805-816.
- Akaike, H. (1974): A New Look at the Statistical Model Identification. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 19(6): 716-723.
- Andújar, D., Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Fernández-Quintanilla, C. & Dorado, J. (2013): Potential of a Terrestrial LiDAR-Based System to Characterise Weed Vegetation in Maize Crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 92: 11-15.
- ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2011): LAS Specification, <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html> (Zugriff: 11.07.13).
- Atkinson, P. M. & Tate, N. J. (2000): Spatial Scale Problems and Geostatistical Solutions: A Review. *The Professional Geographer*, 52(4): 607-623.
- Axelsson, P. (2000): DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2006): *Multivariate Analysemethoden*. Springer Berlin.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2013): *Umwelt Schweiz 2013*. Bern: BAFU (Hrsg.).
- Baltensweiler, A. & Zimmermann, S. (2010): Modeling Soil Acidity in Switzerland Using Spatial Statistics Tools. *Proceedings of the ESRI international user conference*, July.
- Baltsavias, E. P. (1999): Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2): 199-214.
- Barneveld, R. J., Seeger, M. & Maalen-Johansen, I. (2013): Assessment of Terrestrial Laser Scanning Technology for Obtaining High-Resolution DEMs of Soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38: 90-94.
- Bater, C. W. & Coops, N. C. (2009): Evaluating Error Associated with LiDAR-Derived DEM Interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2): 289-300.
- Behrens, T., Zhu, A.-X., Schmidt, K. & Scholten, T. (2010): Multi-Scale Digital Terrain Analysis and Feature Selection for Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 155(3-4): 175-85.
- Bishop, T. F. A., Minasny, B. & McBratney, A. B. (2006) Uncertainty Analysis for Soil-Terrain Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2): 117-134.
- Blume, H. P., Horn, R., Brümmer, G., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Schachtschabel, P., Wilke, B. (2010): *Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Boettinger, J. L., Howell, D., Morre, A., Hartemink, A. & Kienast-Brown, S. (2010): *Digital Soil Mapping: Bridging Research, Production, and Environmental Application*, Springer, 2.

- Bornaz, L. & Rinaudo, F. (2004): Terrestrial Laser Scanner Data Processing. XXth ISPRS Congress Istanbul.
- Bowen, Z. H. & Waltermire, R. G. (2002): Evaluation of Light Detection and Ranging (LiDAR) for Measuring River Corridor Topography. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(1): 33-41.
- Briese, C., Pfeifer, N. & Dorninger, P. (2002): Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A): 55-61.
- Brodu, N. & Lague, D. (2012): 3D Terrestrial LiDAR Data Classification of Complex Natural Scenes Using a Multi-Scale Dimensionality Criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 121-34.
- Carrara, A., Bitelli, G. & Carla, R. (1997): Comparison of Techniques for Generating Digital Terrain Models from Contour Lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5): 451-73.
- Cavazzi, S., Corstanje, R., Mayr, T., Hannam, J. & Fealy, R. (2013): Are Fine Resolution Digital Elevation Models Always the Best Choice in Digital Soil Mapping? *Geoderma*, 195-196: 111-121.
- Corstanje, R., Kirk, G. J. D. & Lark, R. M. (2008): The Behaviour of Soil Process Models of Ammonia Volatilization at Contrasting Spatial Scales. *European Journal of Soil Science*, 59(6): 1271-83.
- Costantino, D. & Angelini, M. G. (2013): Production of DTM Quality by TLS Data. *European Journal of Remote Sensing*, 46: 80-103.
- Coveney, S. & Fotheringham, A. S. (2011): Terrestrial Laser Scan Error in the Presence of Dense Ground Vegetation. *The Photogrammetric Record*, 26(135): 307-24.
- Daniel, C. & Tennant, K. (2001): DEM Quality Assessment. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM Users Manual*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 395-440.
- Dassot, M., Constant, T. & Fournier, M. (2011): The Use of Terrestrial LiDAR Technology in Forest Science: Application Fields, Benefits and Challenges. *Annals of Forest Science*, 68(5): 959-74.
- Dobos, E. & Hengl, T. (2009): Soil Mapping Applications. *Development in Soil Science*, 33: 461-479.
- Efron, B. & Tibshirani, R. J. (1994): *An Introduction to the Bootstrap*. CRC press, 57.
- Elmqvist, M. (2002): Ground Surface Estimation from Airborne Laser Scanner Data Using Active Shape Models. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A): 114-18.
- ESRI, Environmental Systems Research Institut Inc. (2010): Topographic Wetness Index, <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=16750> (Zugriff, 20.10.13).
- ESRI, Environmental Systems Research Institut Inc. (2013): ArcGIS-Hilfe 10.1., <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.1/index.html#//00qn0000001p000000> (Zuriff: 05.07.13).
- FARO Technologies Inc. (2013a): FARO Focus 3D Version 5.2., <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-vermessung/laserscanner-faro-focus-3d/ueberblick> (Zugriff: 03.07.13).

- FARO Technologies Inc. (2013b): FARO Scene Version 5.2., <http://www.faro.com/de-de/produkte/faro-software/scene/ueberblick> (Zugriff: 03.07.13).
- Fowler, A. & Kadatskiy, V. (2011): Accuracy and Error Assessment of Terrestrial, Mobile and Airborne LiDAR. ASPRS Annual Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564.
- Fröhlich, C. & Mettenleiter, M. (2004): Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Surveying. International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 36(Part 8): W2.
- FugroViewer (2013): FugroViewer™ Software, <http://www.fugroviewer.com> (Zugriff: 12.07.13).
- FUSION/LDV (USDA, United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station) (2013): FUSION/LDV Version 3.41., <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html> (Zugriff: 05.08.13).
- Geoportal Kanton Bern (2012): Digitales Höhenmodell LiDAR, http://www.apps.be.ch/geo/index.php?tmpl=index&option=com_easysdi_catalog&Itemid=2&context=geocatalog&toolbar=1&task=showMetadata&type=complete&id=9596c581-45aa-44bd-9dc4-0be6baad5822&lang=de (Zugriff: 05.03.14).
- Gerke, M. & Xiao, J. (2014): Fusion of Airborne Laserscanning Point Clouds and Images for Supervised and Unsupervised Scene Classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87: 78-92.
- Grunwald, S. (2005): Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic information technologies and pedometrics. CRC Press.
- Grunwald, S. (2009): Multi-Criteria Characterization of Recent Digital Soil Mapping and Modeling Approaches. Geoderma, 152(3-4): 195-207.
- Guan, H., Li, J., Yu, Y., Zhong, L. & Ji, Z. (2014): DEM Generation from LiDAR Data in Wooded Mountain Areas by Cross-Section-Plane Analysis. International Journal of Remote Sensing, 35(3): 927-48.
- Guarnieri, A., Pirotti, F. & Vettore, A. (2012): Comparison of Discrete Return and Waveform Terrestrial Laser Scanning for Dense Vegetation Filtering. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39: B7.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2005): The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. The Mathematical Intelligencer, 27(2): 83-85.
- Hengl, T., Heuvelink, G. & Stein, A. (2004): A Generic Framework for Spatial Prediction of Soil Variables Based on Regression-Kriging. Geoderma, 120(1): 75-93.
- Hug, C., Krzystek, P. & Fuchs, W. (2004): Advanced LiDAR Data Processing with LasTools. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35.
- Isenburg, M. (2013): LASzip: Lossless Compression of LiDAR Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 79(2): 209-17.
- Jennessent, J. (2006): Topographic Position Index (TPI) v. 1.3a, <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm> (Zugriff: 02.11.13).

- Jenny, H. (1941): *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Company New York, NY, USA.
- Kadiyala, K. R. (1970): Testing for the Independence of Regression Disturbances. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 97-117.
- Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K. & Lindstaedt, M. (2012): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)*, Schriftenreihe des DVW, 54: 31-56.
- Kilian, J., Haala, N. & Englich, M. (1996): Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31: 383-388.
- Kint, V., Aertsen, W., Wouters, J. & Muys, B. (2009): Stem and Wood Quality Assessment in National Forest Inventories. *Proc of the IUFRO Division*, 4.
- Kleinbaum, D., Kupper, L., Nizam, A. & Rosenberg, E. (2013): *Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*. Cengage Learning.
- Kraus, K. & Mikhail, E. (1972): Linear Least-Squares Interpolation. *Photogrammetric Engineering*, 38: 1016-1029.
- Kraus, K. & Pfeifer, N. (1998): Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53: 193-203.
- Kraus, K., Karel, W., Briese, C. & Mandlbürger, G. (2006): Local Accuracy and Measure for Digital Terrain Models. *The Photogrammetric Record*, 21(116): 342-54.
- Lane, S. N., Westaway, R. M. & Hicks, D. M. (2003): Estimation of Erosion and Deposition Volumes in a Large, Gravel-Bed, Braided River Using Synoptic Remote Sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3): 249-71.
- Leica Geosystems (2009): Leica TPS1200+, http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures/Leica_TPS1200+_brochure_en.pdf (Zugriff: 02.02.14).
- Leica Geosystems (2011): Leica Disto D8, Gebrauchsanweisung, http://www.leica-geosystems.ch/downloads123/cp/disto/d8/manuals/01-en_UM_DistoD8_767718_web_de.pdf (Zugriff: 02.02.14).
- Li, Z. (1988): On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *The Photogrammetric Record*, 12(72): 873-77.
- Liang, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Jaakkola, A. & Wang, Y. (2014): Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services. *Sensors*, 14(1): 1228-48.
- Lichti, D. D., Gordon, S. & Stewart, M. (2002): Ground-Based Laser Scanners: Operation, Systems and Applications. *Geomatica*, 56(1): 21-33.
- Lim, S., Thatcher, C. A., Brock, J. C., Kimbrow, D. R., Danielson, J. J. & Reynolds, B. (2013): Accuracy Assessment of a Mobile Terrestrial LiDAR Survey at Padre Island National Seashore. *International Journal of Remote Sensing*, 34(18): 6355-6366.
- Liu, X. (2008): Airborne LiDAR for DEM Generation: Some Critical Issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1): 31-49.

- Lloyd, C. D. & Atkinson, P.M. (2006): Deriving Ground Surface Digital Elevation Models from LiDAR Data with Geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(5): 535-563.
- Loudermilk, E. L., Singhania, A., Fernandez, J. C., Hiers, J. K., O'Brien, J. J., Cropper, Jr. W. P., Slatton, K. C., Mitchell, R. J. (2007): Application of Ground-Based LiDAR for Fine-Scale Forest Fuel Modeling. USDA Forest Service Processing RMRS-P-46CD.
- Malone, B. P., McBratney, A. B. & Minasny, B. (2013): Spatial Scaling for Digital Soil Mapping. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3): 890.
- Mayer, D. & Butler, D. (1993): Statistical Validation. *Ecological Modelling*, 68(1): 21-32.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L. & Minasny, B. (2003): On Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52.
- McDaniel, M. W., Nishihata, T., Brooks, C. A., Salesses, P. & Iagnemma, K. (2012): Terrain Classification and Identification of Tree Stems Using Ground-Based LiDAR. *Journal of Field Robotics*, 29(6): 891-910.
- McGaughey, R. J. (2013): FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization, http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf (Zugriff: 03.07.13).
- MeteoSchweiz (2013): Klimabulletin Jahr 2013, http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/jahresflash/bulletin2013.html (Zugriff: 02.02.13).
- Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B.P. & Wheeler, I. (2013): Digital Mapping of Soil Carbon. *Adv. Agron*, 118: 1-47.
- Mongus, D. & Zalik, B. (2012): Parameter-Free Ground Filtering of LiDAR Data for Automatic DTM Generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 1-12.
- Moran, P. A. (1950): Notes On Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, 37(1-2): 17-23.
- Mosimann, T. & Herbst, P. (2013): Flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 164(1): 10-22.
- Muñoz, J. D. & Kravchenko, A. (2012): Deriving the Optimal Scale for Relating Topographic Attributes and Cover Crop Plant Biomass. *Geomorphology*, 179: 197-207.
- Nussbaum, M. (2011): Modellierung des organischen Kohlenstoffgehalts und -vorrats in Schweizer Waldböden. Masterarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Ozdemir, H., Sampson, C. C., de Almeida, G. A. M. & Bates, P. D. (2013): Evaluating Scale and Roughness Effects in Urban Flood Modelling Using Terrestrial LiDAR Data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Copernicus GmbH*, 10: 5903-5942.
- Panholzer, H. & Prokop, A. (2013): Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data. *Sensors*, 13(2): 2579-2594.
- Park, S. J. & Vlek, L. G. (2002): Environmental Correlation of Three-Dimensional Soil Spatial Variability: a Comparison of Three Adaptive Techniques. *Geoderma*, 109: 117-140.
- Pennock, D. J. & Veldkamp, A. (2006): Advances in Landscape-Scale Soil Research. *Geoderma*, 133(1); 1-5.
- Pirotti, F., Guarnieri, A. & Vettore, A. (2013): Ground Filtering and Vegetation Mapping Using Multi-Return Terrestrial Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76: 56-63.

- Podobnikar, T. (2009): Methods for Visual Quality Assessment of a Digital Terrain Model. SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society, 2.2.
- Prentice, S. (2014): Soil-Landscape Modeling of Coastal California Hillslopes Using Terrestrial LiDAR. Doktorarbeit, Universität Kalifornien, Santa Barbara.
- Puttonen, E., Lehtomäki, M., Kaartinen, H., Zhu, L., Kukko, A. & Jaakkola, A. (2013): Improved Sampling for Terrestrial and Mobile Laser Scanner Point Cloud Data. *Remote Sensing*, 5(4): 1754-1773.
- R Software (2013): The R Project for Statistical Computing, Version 2.15.3, <http://www.r-project.org> (Zugriff: 28.11.13).
- Rapidlasso (2013): LasTools, <http://rapidlasso.com> (Zugriff: 29.07.13).
- Roecker, S. & Thompson, J. (2010): Scale Effects on Terrain Attribute Calculation and Their Use as Environmental Covariates for Digital Soil Mapping. *Digital Soil Mapping*, 55-66.
- Ruiz, A., Kornus, W., Talaya, J. & Colomer, J. (2004): Terrain Modeling in an Extremely Steep Mountain: A Combination of Airborne and Terrestrial LiDAR. Proceedings of 20th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress on Geo-imagery Bridging Continents, Istanbul, Turkey.
- Rykiel, E. J. (1996): Testing Ecological Models: the Meaning of Validation. *Ecological Modelling*, 90(3): 229-244.
- Schulz, T. & Zogg, H. M. (2006): Terrestrisches Laserscanning in der Geomatik. *Geomatik Schweiz*, 104(8): 420.
- Schürch, P., Densmore, A. L., Rosser, N. J., Lim, M. & McArdell, B. W. (2011): Detection of Surface Change in Complex Topography Using Terrestrial Laser Scanning: Application to the Illgraben Debris-Flow Channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(14): 1847-1859.
- Schwarz, G. (1978): Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2): 461-464.
- Schweizerischer Nationalfonds (2013): Ressource Boden – Nationales Forschungsprogramm NFP 68 - Portrait, <http://www.nfp68.ch/D/portrait/Seiten/default.aspx> (Zugriff: 03.07.13).
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A. & McArthur, D. (2003): Predictive Soil Mapping: a Review. *Progress in Physical Geography*, 27(2): 171-197.
- Shan, J. & Toth, C. K. (2008): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press.
- Sharma, M., Paige, G. B. & Miller, S. N. (2010): DEM Development from Ground-Based LiDAR Data: A Method to Remove Non-Surface Objects. *Remote Sensing*, 2(11): 2629-2642.
- Sithole, G. & Vosselman, G. (2004): Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1-2): 85-101.
- Sithole, G. & Vosselman, G. (2005): Filtering of Airborne Laser Scanner Data Based on Segmented Point Clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(part 3): W19.
- Smith, M. P., Zhu, A.-X., Burt, J. E. & Stiles, C. (2006): The Effects of DEM Resolution and Neighborhood Size on Digital Soil Survey. *Geoderma*, 137: 58-69.

- Stahel, W. (2007): Statistische Datenanalyse: Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Vieweg + Teubner Verlag.
- Stone, M. (1974): Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 111-147.
- Swisstopo, Bundesamt für Landestopographie (2013): Höhenmodell swissAlti3D, <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html> (Zugriff: 25.07.13).
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N. & Genevois, R. (2007): Terrestrial Laser Scanner to Detect Landslide Displacement Fields: a New Approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28(16): 3425-3446.
- Thompson, J. A., Bell, J. C. & Butler, C. A. (2001): Digital Elevation Model Resolution Effects on Terrain and Attribute Calculation and Quantitative Soil-Landscape Modeling. *Geoderma*, 100: 67-89.
- TLSpy (2013): TLSpy Sourceforge, <http://tspy.sourceforge.net/index.htm> (Zugriff: 25.11.13).
- Verbyla, D. L. & Litvaitis, J. A. (1989): Resampling Methods for Evaluating Classification Accuracy of Wildlife Habitat Models. *Environmental Management*, 13(6): 783-787.
- Vosselman, G. (2000): Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/2; PART 3): 935-942.
- Wilson, J. P. & Gallant, J. C. (2000): *Digital Terrain Analysis*. John Wiley and Sons: New York.
- Wilson, J. P. 2012): Digital Terrain Modeling. *Geomorphology*, 137(1): 107-121.
- Wise, S. (2011): Cross-Validation as a Means of Investigating DEM Interpolation Error. *Computers & Geosciences*, 37(8): 978-991.
- Wise, S. M. (2007): Effect of Differing DEM Creation Methods on the Results from a Hydrological Model. *Computers & Geosciences*, 33(10): 1351-1365.
- Wollschläger, D. (2012): *Grundlagen der Datenanalyse mit R: eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer DE.
- WSL, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (2013a): Waldressourcen Projekte – Digitale Bodenkartierung, http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/projekte/gis_pmsoil/index_DE (Zugriff: 03.07.13).
- WSL, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (2013b): LWF Forschungsfläche Alptal, http://www.wsl.ch/info/organisation/fpo/lwf/methodology/plots/forschungsflaechen/alptal_DE (Zugriff: 03.07.13).
- Yang, X. & Hodler, T. (2000): Visual and Statistical Comparisons of Surface Modeling Techniques for Point-Based Environmental Data. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(2): 165-176.
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J. & Zhang, C. (2003): A Progressive Morphological Filter for Removing Non-Ground Measurements from Airborne LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 872-882.

Anhang

A Übersicht Regressionsmodelle

Im Anhang A werden Zusammenfassungen der wichtigsten Zahlenresultate sowie die statistischen Plots zu den einzelnen Regressionsmodellen (siehe Tab. 17) aufgelistet (Anhang A1. bis A7.). Detaillierte Informationen zu den Methoden rund um die multiplen Regressionsanalysen (mit den Modellannahmen) sowie zu den Resultaten und Interpretationen der Modelle (vor allem am Beispiel des Modelles DTMa01) können in Kapitel 3.3.2 beziehungsweise in Kapitel 4.2.2 gefunden werden.

A1. DTMa01 – 20cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 29.01.2014
 Modellname: Residm4_cv_v14_DTMa01 (Nr. 11)
 Dokumentation: cv_v16_BS_all_DTMa01.txt, cv_v14_BS_all_DTMa01_2_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 20cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = pH_mean ~ curpla_a01 + flleu_a01fm12 + tpiflleu_a01_m12, data = BSall)`

Moran's I: -0.046

BIC: -40.97

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.3859 -0.4658 0.1014 0.4170 1.2201

Kreuzvalidierung

: k=10

R² 0.540

R² cv 0.494

R² adj. 0.516

R² adj. 0.469

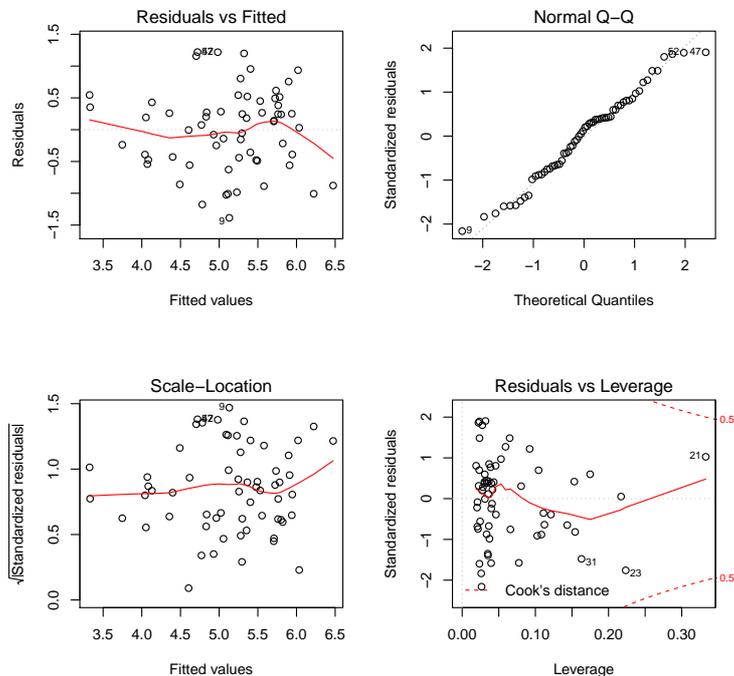
cv

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4.3964314	0.1497439	29.360	< 2e-16 ***
curpla_a01	-0.0021888	0.0006618	-3.307	0.001621 **
flleu_a01fm12	0.3614947	0.0506740	7.134	1.75e-09 ***
tpiflleu_a01_m12	1.0452922	0.2818932	3.708	0.000469 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6504 on 58 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.54, Adjusted R-squared: 0.5162
 F-statistic: 22.7 on 3 and 58 DF, p-value: 7.607e-10



A2. DTMa02 – 80cm Auflösung

Modellübersicht

Datum:	01.02.2014
Modellname:	Residm7_DTMa02 (Nr. 20)
Dokumentation:	dp_v01_DTMa02_2_sum.txt, dp_cv_v02_DTMa02_2_sum.txt
Datengrundlage:	BSall
Information:	80cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
lm(formula = pH_mean ~ curpla_a02_m3 + flleu_a02_m6 + tpiwi_a02_m3,
data = BSall)

Moran's I: -0.042

Residuals:
Min 1Q Median 3Q Max
-1.6923 -0.5112 0.1132 0.5278 1.3383

BIC: -36.26

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 4.53987 0.17877 25.395 < 2e-16 ***
curpla_a02_m3 -0.07801 0.01818 -4.292 6.82e-05 ***
flleu_a02_m6 0.09607 0.02037 4.717 1.55e-05 ***
tpiwi_a02_m3 1.22366 0.53129 2.303 0.0249 *

Kreuzvalidierung: k=10

R² 0.504

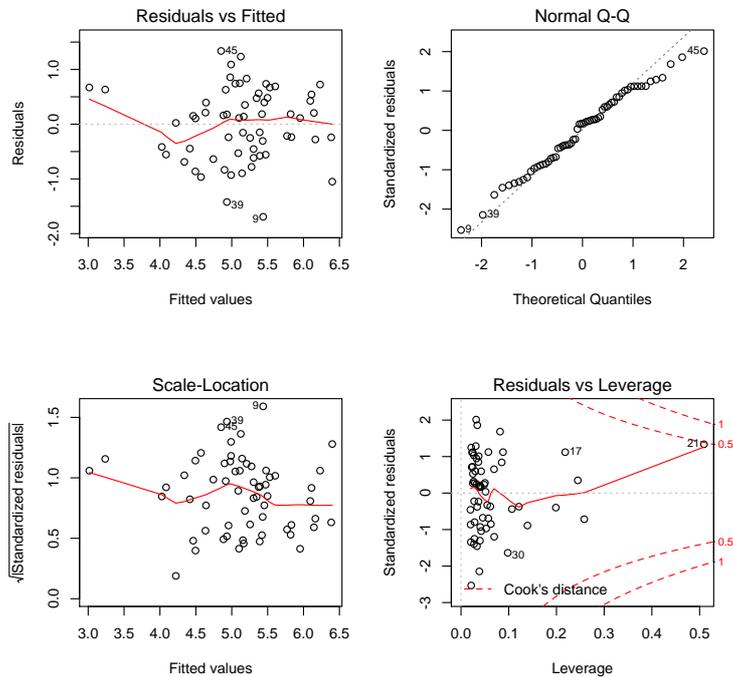
R² cv 0.446

R² adj. 0.478

R² adj. cv 0.400

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6756 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.5037, Adjusted R-squared: 0.4781
F-statistic: 19.62 on 3 and 58 DF, p-value: 6.657e-09



A3. DTMa03 – 200cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 02.02.2014
 Modellname: Residm6_DTMa03 (Nr. 21)
 Dokumentation: dp_v01_DTMa03_sum.txt, dp_cv_v02_DTMa03_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 200cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = pH_mean ~ curpla_a03 + flleu_a03_m2, data = BSall)`

Moran's I: -0.023

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.35917 -0.49370 -0.05064 0.45995 1.51675

BIC: -38.59

Coefficients:

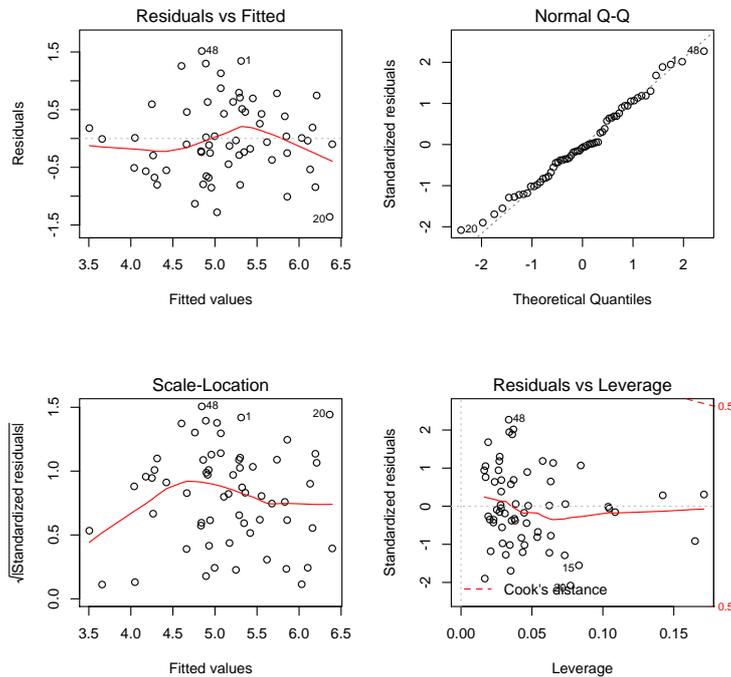
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4.865388	0.152027	32.004	< 2e-16 ***
curpla_a03	-0.054504	0.009148	-5.958	1.52e-07 ***
flleu_a03_m2	0.021413	0.007199	2.974	0.00425 **

Kreuzvalidierung: k=10

R ²	0.489
R ² cv	0.445
R ² adj.	0.472
R ² adj. cv	0.426

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6796 on 59 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.4892, Adjusted R-squared: 0.4718
 F-statistic: 28.25 on 2 and 59 DF, p-value: 2.481e-09



A4. DTMa04 – 60cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 05.02.2014
 Modellname: Residm7_DTMa04 (Nr. 19)
 Dokumentation: dp_v01_DTMa04_sum.txt, dp_cv_v02_DTMa04_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 60cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = "pH_mean~ curpla_a04_m4+flleu_a04_m4+tpiflleu_a04_m6", data = BSall)`

Moran's I: -0.037

BIC: -36.84

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.57590 -0.41238 0.02807 0.43307 1.32565

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4.55793	0.17258	26.411	< 2e-16 ***
curpla_a04_m4	-0.03999	0.01984	-2.015	0.0486 *
flleu_a04_m4	0.14435	0.03149	4.584	2.48e-05 ***
tpiflleu_a04_m6	0.18676	0.07879	2.370	0.0211 *

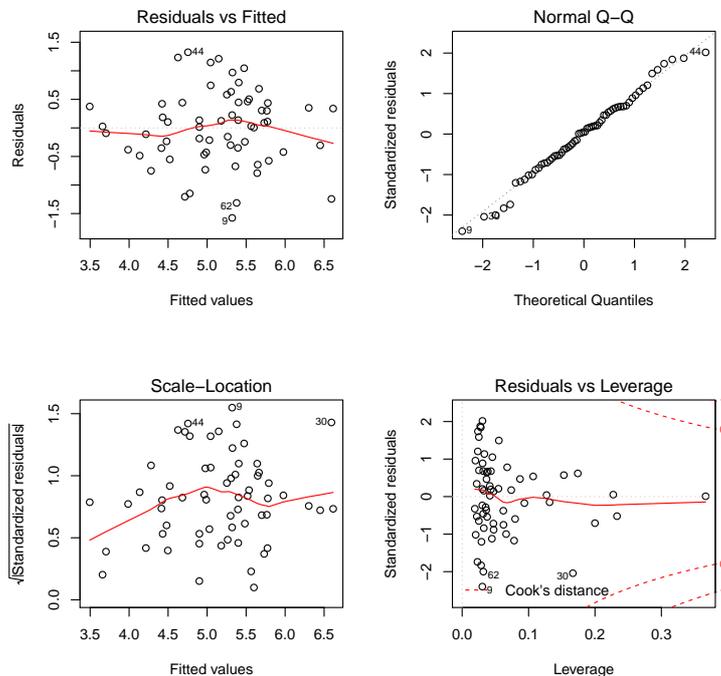
Kreuzvalidierung:

k=10

R ²	0.516
R ² cv	0.471
R ² adj.	0.491
R ² adj. cv	0.443

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6674 on 58 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.5156, Adjusted R-squared: 0.4906
 F-statistic: 20.58 on 3 and 58 DF, p-value: 3.332e-09



A5. DTMa05 – 400cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 05.02.2014
 Modellname: Residm6_DTMa05 (Nr. 22)
 Dokumentation: dp_v01_DTMa05_2_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 400cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = pH_mean ~ curpla_a05, data = BSall)`

Moran's I: -0.022

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.74417 -0.67295 -0.01713 0.70130 1.78045

BIC: -13.29

Coefficients:
 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
 (Intercept) 5.1868 0.1091 47.519 < 2e-16 ***
 curpla_a05 -0.1084 0.0300 -3.615 0.000616 ***

Kreuzvalidierung

: k=10

R² 0.179

R² cv 0.144

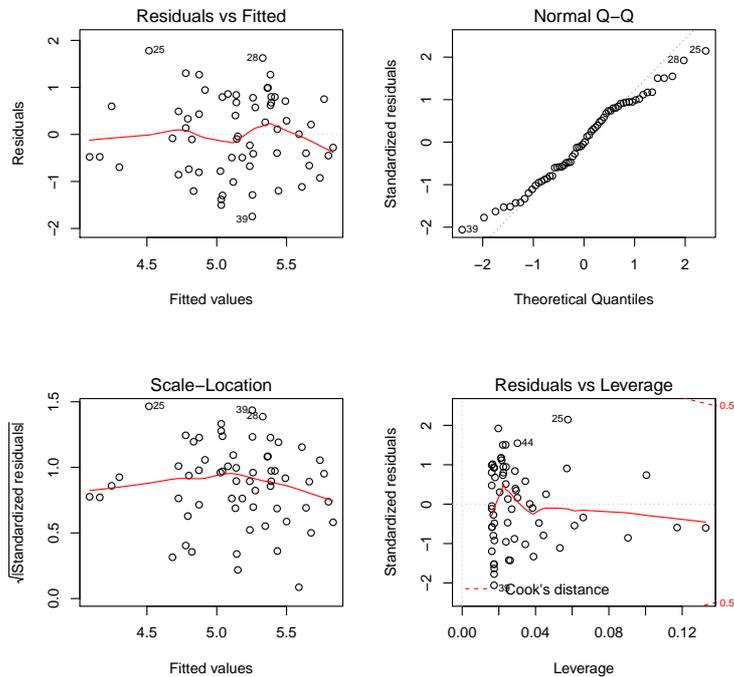
R² adj. 0.166

R² cv adj. 0.130

cv

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8544 on 60 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.1788, Adjusted R-squared: 0.1652
 F-statistic: 13.07 on 1 and 60 DF, p-value: 0.0006162



A6. DTMa06 – 20cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 06.02.2014
 Modellname: Residm7_DTMa06 (Nr. 13)
 Dokumentation: dp_v01_DTMa06_sum.txt, dp_cv_v02_DTMa06_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 20cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = pH_mean ~ flleu_a06_m12 + twi_a06 + tpiflleu_a06_m12, data = BSall)`

Moran's I: -0.038

BIC: -36.26

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.57222 -0.34401 0.02217 0.36318 1.40944

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.80966	0.26926	14.149	< 2e-16 ***
flleu_a06_m12	0.32208	0.04941	6.519	1.88e-08 ***
twi_a06	0.10142	0.03741	2.711	0.008802 **
tpiflleu_a06_m12	1.10340	0.31138	3.544	0.000787 ***

Kreuzvalidierung:

k=10

R² 0.504

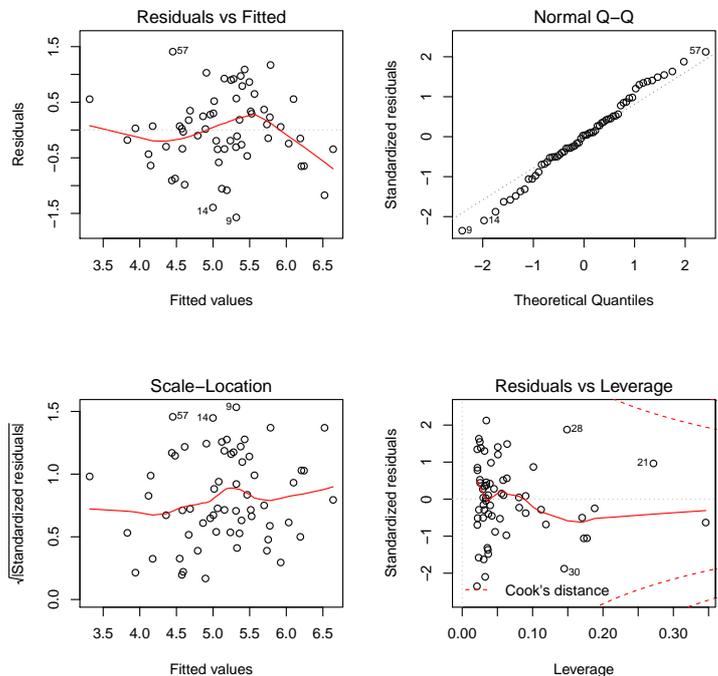
R² cv 0.437

R² adj. 0.478

R² adj. cv 0.408

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6756 on 58 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.5037, Adjusted R-squared: 0.4781
 F-statistic: 19.62 on 3 and 58 DF, p-value: 6.655e-09



A7. Swissalti3D – 200cm Auflösung

Modellübersicht

Datum: 02.02.2014
 Modellname: Residm6_Swissalti3D (Nr. -)
 Dokumentation: dp_v01_Swissalti3D_sum.txt, dp_cv_v02_Swissalti3D_sum.txt
 Datengrundlage: BSall
 Information: 200cm Auflösung

Zusammenfassung:

Call:
`lm(formula = pH_mean ~ curpla_swi2mc + flleu_swi2fm2 + slop_swi2_m6, data = BSall)`

Moran's I: -0.048

BIC: -6.61

Residuals:
 Min 1Q Median 3Q Max
 -1.61812 -0.51265 0.01341 0.64510 1.66202

Kreuzvalidierung:

k=10

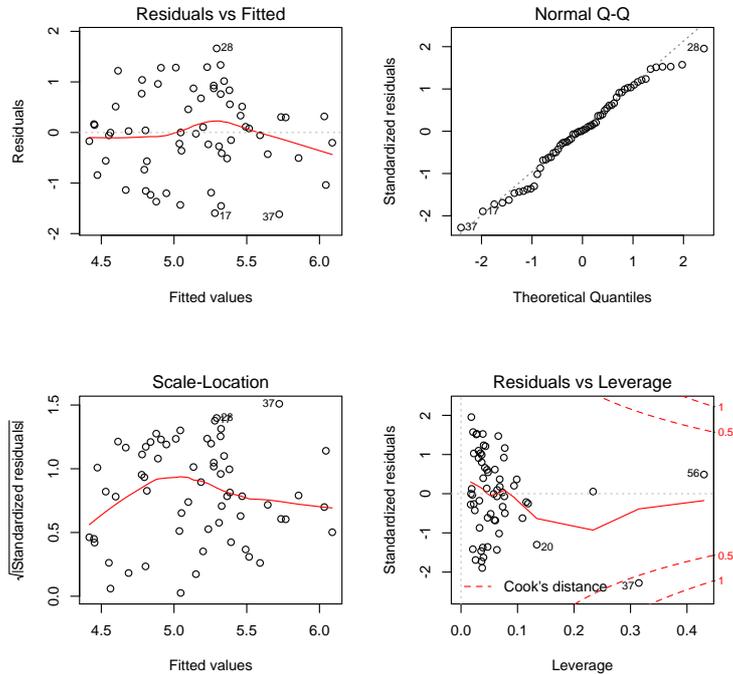
R ²	0.199
R ² cv	0.141
R ² adj.	0.158
R ² adj. cv	0.096

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.737697	0.589448	6.341	3.71e-08 ***
curpla_swi2mc	-0.038005	0.015372	-2.472	0.01638 *
flleu_swi2fm2	0.009458	0.003140	3.012	0.00384 **
slop_swi2_m6	0.075071	0.036322	2.067	0.04323 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8581 on 58 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.1994, Adjusted R-squared: 0.158
 F-statistic: 4.814 on 3 and 58 DF, p-value: 0.004625



B Informationen zum Inhalt der beiliegenden DVD

Die tabellarische Übersicht gibt Auskunft über die auf der beiliegenden DVD abgelegten Dokumente. Die digitalen Dokumente sind gemäss dem Arbeitsprozess aufgeteilt und beinhalten detaillierte Informationen über verschiedene Arbeitsschritte. Die statistische Modellierung wird anhand des Modells DTMa06 beispielhaft aufgezeigt.

Ordner	Dateiname	Beschreibung
A_Dokument_ Masterarbeit	Masterarbeit_GIUZ_ ALenggenhager_April2014.pdf	Arbeit im Format pdf und rtf
	Masterarbeit_GIUZ_ ALenggenhager_April2014.rtf	
B_Bodendaten	01_pH_Altpal_LWF_Messformular.pdf	Messdaten pH und Textur
	02_Textur_Altpal_LWF_Messformular.pdf	
C_Teil_I_TLS	01_Lastools_Gesamt_v17_v22.pdf	Modellgenerierung
	02_Fusion_Altpal_Beiispiel.pdf	
	03_Fusion_Altpal_v01_v18.pdf	
	04_DTM_Validierung_Teil_1.xlsx	
	05_DTM_Validierung_Teil_2.xlsx	
D_Teil_II_Stat Mod_DTMa06	01_DTMa06_Daten_Übersicht.pdf	Datenübersicht DTMa06
	02_R_Script_corr_pH_DTMa06.pdf	Korrelationsanalyse
	03_Output_corr_expvar_all_pH_DTMa06_1.pdf	
	04_Output_corr_expvar_all_pH_DTMa06_2.pdf	
	05_R_Script_dp_v01_DTMa06.pdf	Regressionsanalyse
	06_Output_dp_v01_DTMa06.pdf	
	07_Output_dp_v01_DTMa06_sum.pdf	
	08_R_Script_dp_cv_v02_DTMa06.pdf	Kreuzvalidierung
	09_Output_dp_cv_v02_DTMa06.pdf	
	10_Output_dp_cv_v02_DTMa06_sum.pdf	
	11_residm6_DTMa06_20cm_Auflösung.pdf	Modellübersicht
	12_residm7_DTMa06_20cm_Auflösung.pdf	

Selbstständigkeitserklärung

Persönliche Erklärung:

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

Anja Lenggenhager
Zürich, 30. April 2014