

GIS-basierte geomorphologische Kartierung im Sihlwald mittels hochauflösendem Laserscan-Geländemodell

Diplomarbeit

am Geographischen Institut der Universität Zürich

Marco Zuan

Betreuung:

Dipl. Geogr. Ronald Schmidt
Prof. Dr. Max Maisch

Fakultätsvertretung:

Prof. Dr. Robert Weibel

Zürich, Juni 2008

Dank

Ich danke meinem Betreuer dipl. geogr. Ronald Schmidt für seine Unterstützung und Geduld. Er hat mich mit seinem Enthusiasmus immer wieder motiviert, weiterzumachen.

Ebenso danke ich Prof. Dr. Max Maisch für seine Ratschläge im Bereich der Geomorphologie und das sorgfältige Korrekturlesen der Arbeit.

Bei meinen Bürokollegen Andrea und Stefan bedanke ich mich für die Hilfsbereitschaft und die vielen lustigen Augenblicke.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mich in allen Belangen immer unterstützt haben.

Zusammenfassung

Die Naturlandschaft Sihlwald gilt als grösster zusammenhängender Laubmischwald im Schweizer Mittelland. Das Naherholungsgebiet südlich von Zürich wird von verschiedenen Universitäten und Institutionen als Forschungsobjekt genutzt.

In diesen Kontext ist auch die vorliegende Diplomarbeit eingebettet. Das Hauptziel der Untersuchung bildet die geomorphologische Kartierung des ca. 11 km² grossen Untersuchungsgebietes. Sämtliche geomorphologischen Formen und Prozesse wurden durch Interpretation eines hochauflösenden Laserscan-Geländemodells kartiert, und nicht wie bis anhin mittels Luftbildinterpretation. Zusätzlich wurden Feldbegehungen durchgeführt. Die Befunde wurden in ArcGIS 9.2 digitalisiert und anhand eines Datenmodells attribuiert. Die kartographische Umsetzung erfolgte mit Hilfe eines Legendenkonzeptes, das sich an den bestehenden Legenden-schlüsseln der geomorphologischen Kartierungen im Berninagebiet orientiert.

Die vorliegende Arbeit soll aufzeigen, dass der digitale Datensatz für weitere Analysen und Abfragen gezielt verwendet werden kann. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt. Es galt, die Volumen der Bachtobel und daraus die generellen Abtragungsraten seit dem Rückzug des Linthgletschers abzuschätzen.

Die Resultate der Kartierung haben gezeigt, dass sich Laserscan-Geländemodelle in stark bewaldeten Gebieten sehr gut für geomorphologische Kartierungen eignen. Die Berechnungen der Abtragungsraten belegen die hohe Erosionsanfälligkeit der Bäche im Sihlwald. Die Gebirgsbäche der Schweizer Alpen weisen ähnlich grosse Werte auf.

Inhalt

Dank	i
Zusammenfassung	ii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Glossar	viii
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund und Motivation	1
1.2. Zielsetzung	1
1.3. Forschungsfragen	2
1.4. Vorgehen	2
1.5. Aufbau der Arbeit	3
2. Grundlagen	4
2.1. Airborne Laser Scanning	4
2.2. Geomorphologie und geomorphologische Karten	7
2.3. GIS in der Geomorphologie	9
2.4. Forschungsstand	10
2.4.1. Geomorphologische Kartierung	10
2.4.2. Extraktion von Information aus Geländemodellen	11
2.5. Das Untersuchungsgebiet	12
2.5.1. Der Sihlwald	12
2.5.2. Geologie	14
2.5.3. Klima	17
2.5.4. Geschichte der Holznutzung und des Holztransportes	18
2.6. GIS Sihlwald	19
2.7. Verwendete Quellen und Daten	20
3. Geomorphologische Prozessbereiche	23
3.1. Gravitativer Prozessbereich	24
3.2. Denudativer Prozessbereich	25
3.3. Fluvialer Prozessbereich	26

3.4. Glazialer Prozessbereich	28
3.5. Organo-biogener Prozessbereich	28
3.6. Limnischer Prozessbereich	29
3.7. Anthropogener Prozessbereich	29
3.8. Reliefformen	30
4. Methodik	31
4.1. Geomorphologische Kartierung	31
4.2. Kartierung mittels Laserscan-DGM	33
4.3. Feldkartierung	36
4.4. Vermessung mit GPS	38
4.5. Digitalisierung der Geometrie und Erstellung des Datensatzes	39
4.6. Datenmodell	40
4.7. Legendenkonzept	43
4.8. Deskriptive Statistik	46
4.9. Analyse	46
5. Resultate	49
5.1. Ergebnisse der Kartierung	49
5.1.1. Datensatz	49
5.1.2. Geomorphologische Karte	51
5.1.3. Deskriptive Statistik	53
5.2. Kartierung mittels Laserscan-Geländemodell	55
5.2.1. Ergebnisse der GPS-Vermessung	55
5.2.2. Interpretationskriterien	57
5.2.2.1. Direkte Kriterien	57
5.2.2.2. Indirekte Kriterien	58
5.3. Ergebnisse der Analyse	59
5.3.1. Volumenberechnung	59
5.3.2. Erosionsleistung	60
5.3.3. Vergleich	64
6. Diskussion	65
6.1. Geomorphologische Kartierung	65
6.2. Beurteilung der Laserscaninterpretation	66
6.3. Analyse	69

6.4. Fehlerbetrachtung	70
7. Schlussfolgerungen und Ausblick	73
7.1. Schlussfolgerungen	73
7.2. Ausblick	74
Literaturverzeichnis	77
A. Anhang	82
A.1. Feldkarte	82
A.2. Gliederung des Formencodes	83
A.3. Attributtabelle	85
A.4. Legendenkonzept	86

Abbildungsverzeichnis

2.1. Die Funktion des Laserscanners	5
2.2. DGM und Schräglichtschattierung vom Sihlwald	6
2.3. Das Untersuchungsgebiet Sihlwald	13
2.4. Blick von der Hochwacht Richtung Albishorn	14
2.5. Blockbildausschnitt mit der Geologie	16
2.6. Die Transportwege im Sihlwald um 1910	19
2.7. Die Aufgaben des GIS Sihlwald	20
3.1. Hangkriechen	26
3.2. Erosionsrinne	27
3.3. Ried	29
3.4. Natürlicher Aufschluss	30
4.1. Schräglichtschattierung mit Beleuchtung aus Nordwesten	34
4.2. Schräglichtschattierung mit Beleuchtung aus Nordosten	34
4.3. Artefakte in der Schräglichtschattierung	35
4.4. Beispiele von Rutschungen im Sihlwald	38
4.5. Topologiefehler	39
4.6. Legende	45
4.7. Untersuchte Bachtoibel	47
5.1. Die drei verschiedenen Feature-Klassen	50
5.2. Geomorphologische Karte Sihlwald	52
5.3. Hangneigung einer Rutschung	53
5.4. Resultate der GPS-Vermessung	56
5.5. Bachtoibel im heutigen Zustand	59
5.6. Bachtoibel im früheren vermuteten Zustand	60
5.7. Abtragungsraten der Bachtoibel	63

Die Bilder stammen, wenn nichts Anderes erwähnt ist, vom Verfasser dieser Arbeit.

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich der Klimabedingungen im Sihlwald und in Zürich	18
2.2. Verwendete Quellen und Datensätze	21
2.3. Laserscanner-Daten	22
4.1. Hierarchische Gliederung des Formencodes	41
4.2. Prozessbereiche	41
4.3. Substrat	41
4.4. Datenqualität	42
4.5. Universal Identification Number	42
4.6. Farbgebung	44
5.1. Deskriptive Statistik	54
5.2. Direkte Interpretationskriterien	57
5.3. Indirekte Interpretationskriterien	58
5.4. Erosion der Bachtobel im Sihlwald	60
5.5. Bachtobel als Erosionsgebiete	64
6.1. Beurteilung der Laserscan-Interpretation	67

Abkürzungsverzeichnis

ALS:	Airborne Laser Scanning
ArcGIS:	Desktop GIS der Firma ESRI
DGM:	Digitales Geländemodell
DOM:	Digitales Oberflächenmodell
GIS:	Geographisches Informationssystem
GMK:	Konzept zur Herstellung geomorphologischer Karten
GPS:	Global Positioning System
INS:	Inertial Navigation System
LiDAR:	Light Detection and Ranging
SDTS:	Spatial Data Transfer Standard
SGmG:	Schweizerische Geomorphologische Gesellschaft
TIN:	Triangular Irregular Network

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Motivation

Begonnen hat mein Interesse für den Sihlwald (siehe Abschnitt 2.5) bereits im GIS-Projektseminar im Sommersemester 2005, das Teil meines Fachstudiums am Geographischen Institut an der Universität Zürich war. Dort wurden von zwei Arbeitsgruppen einerseits das Gewässernetz und andererseits die Höhenlinien im Sihlwald generiert. Durch die Belegung der Blöcke "Geomorphologie" und "GIS" im Fachstudium, durch die Faszination für Karten im Allgemeinen und die Möglichkeit im Feld tätig zu sein, wurde meine Aufmerksamkeit auf dieses Diplomarbeitsthema gelenkt. Die Herausforderung, eine Karte von Grund auf zu gestalten und die Aussicht, dass die generierten Daten für Forschung, Planung aber auch für Besucher des Sihlwaldes interessant zu werden versprechen, sind zusätzliche Motivationen.

Geomorphologische Karten sind wichtige Basisdaten für die Forschung, für die Gefahrenbeurteilung oder für weitere Analysen. Im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung im Sihlwald wurden bisher verschiedene Datenerhebungskampagnen durchgeführt. Dabei wurde die Geomorphologie im Sihlwald aber noch nicht detailliert kartiert.

Modernste Datenerhebungsmethoden (Laserscanning), wie sie im Sihlwald zum Einsatz kommen, ermöglichen eine Kartierung auch in dicht bewaldeten Gebieten. Daher wird die neu geplante Kartierung nicht wie bis anhin durch eine Luftbildinterpretation, sondern durch Deutung eines hochauflösenden Laserscan-Geländemodells erstellt. Dadurch soll der Zeitaufwand vor allem für die Feldarbeit reduziert und das Problem von schwer zugänglichem Gelände umgangen werden.

1.2. Zielsetzung

Die geomorphologische Kartierung des Sihlwaldes mit Hilfe eines Laserscan-Geländemodells und damit verbunden das Erstellen eines flächendeckenden neuen digitalen Datensatzes standen im Vordergrund dieser Arbeit. Der Datensatz soll ansch-

1. Einleitung

liessend in die Geodatenbank GIS Sihlwald (siehe Abschnitt 2.6) integriert werden. Auf dieser Datengrundlage aufbauend, werden die geomorphologischen Formen und Prozesse statistisch beschrieben. Zu diesem Zweck wurden einzelne Formen mittels GPS vermessen, um die Vor- und Nachteile gegenüber einem Laserscan zu beurteilen. Ausserdem galt es, das Volumen der Bachtobel und die mittlere Erosionsleistung seit Ende der letzten Eiszeit zu berechnen. Während der Feldarbeit wurden zudem geomorphologische Formen photographisch festgehalten und anschliessend mittels Hyperlinks in die digitale Karte integriert.

1.3. Forschungsfragen

An einem praktischen Beispiel soll die Frage beantwortet werden, wie ein hochauflösendes Laserscan-Geländemodell die Identifizierung und Kartierung geomorphologischer Formen in einem dicht bewaldeten Gebiet ermöglichen und vereinfachen kann. Die Forschungsfragen dazu lauten:

- Welche geomorphologischen Formen und Prozesse treten im Sihlwald auf und welches sind die Hauptprozesse?
- Wie lassen sich geomorphologische Formen und Prozesse aus einem Laserscan-Geländemodell identifizieren?
- Wie gross ist das abgetragene Volumen und die mittlere Erosionsleistung der Bachtobel seit dem Rückzug des Linthgletschers?

1.4. Vorgehen

Durch eingehendes Studium von topographischen und geologischen Karten sowie unter Einbezug des Laserscan-Geländemodells musste zuerst ein Überblick über das Kartierungsgebiet gewonnen werden. Die Literaturrecherche über geomorphologische Aufnahmeverfahren und Feldmethoden, GIS-Software und die geomorphologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet erfolgten parallel dazu. In der Folge wurden auffallende, klar abgrenzbare Formen (sogenannte geomorphologische Hot Spots) mittels Betrachtung des Laserscan-Geländemodells identifiziert, während zugleich ein Legendenkonzept und ein Datenmodell für das GIS erstellt

wurde. Anschliessend wurde die Digitalisierung geomorphologischer Formen und Prozesse in einem Geographischen Informationssystem (siehe Abschnitt 2.3) anhand des Laserscan-Geländemodells eingeleitet und laufend verfeinert. Auf die Arbeit im Büro folgte die Kartierung im Feld, wobei geomorphologisch interessante Formen aufgenommen und photographisch dokumentiert wurden. Die Kartierung geschah einerseits qualitativ durch die Interpretation des hochauflösenden Laserscan-Geländemodells und andererseits durch gezielte Geländebegehungen.

1.5. Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung im ersten Kapitel wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen und die verschiedenen Hilfsmittel für die Erstellung der geomorphologischen Karte eingegangen. Sodann werden der Forschungsstand und das Untersuchungsgebiet kurz vorgestellt. Es folgt Kapitel 3 mit den Definitionen und der Schilderung der kartierten Formen und Prozesse. Im vierten Kapitel wird die Methodik der Kartierung und die Berechnung der Erosionsleistung genauer erläutert. Daran anschliessend folgen in Kapitel 5 die Ergebnisse. Zum Schluss werden in Kapitel 6 die Resultate diskutiert und in Kapitel 7 ein Fazit gezogen, das auch einen Ausblick auf mögliche Forschungsziele enthält.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen wie Airborne Laser Scanning, GIS, Geomorphologie und Kartierung erläutert. Ausserdem werden die Eigenschaften des Untersuchungsgebietes charakterisiert und die Funktion des Datenzentrums Sihlwald erläutert.

2.1. Airborne Laser Scanning

Das Airborne Laser Scanning (ALS), in der Literatur auch als LiDAR, Laser Altimetry oder kurz als Laserscanning bezeichnet, ist die flugzeug- oder helikoptergetragene Vermessung der Erdoberfläche. Das Ziel ist die Abbildung der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Objekte wie Vegetation oder Gebäude (Ackermann, 1999; Petzold et al., 1999).

Die Entwicklung des ALS geht in die 70er und 80er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück. Frühe Experimente fanden vor allem in Nordamerika statt. Aber erst in den frühen 90er Jahren wurde die nötige Exaktheit erreicht, um Entfernungsmessungen durchzuführen (Baltsavias et al., 1999). Erste Ansätze über die Nutzung von ALS als neue Methode zur Erstellung von digitalen Geländemodellen fanden 1994 statt. Diese Technik erlaubte die Abbildung der Erdoberfläche und neu auch der Gebäude und der Vegetation (Petzold et al., 1999).

Beim ALS wird mittels Laserimpulsen mit bestimmter Wellenlänge die Entfernung zwischen einer Plattform (Flugzeug oder Helikopter) und der Erdoberfläche gemessen (Abb. 2.1). Dazu werden verschiedene Technologien benötigt. Einerseits die Laser-Technologie, die seit den 1960er Jahren verwendet wird, und andererseits differentiell GPS und das Trägheitsnavigationssystem, die es erlauben, jederzeit die exakte Position des Flugzeuges und die Ausrichtung des Sensors im Raum zu bestimmen (Straumann, 2005).

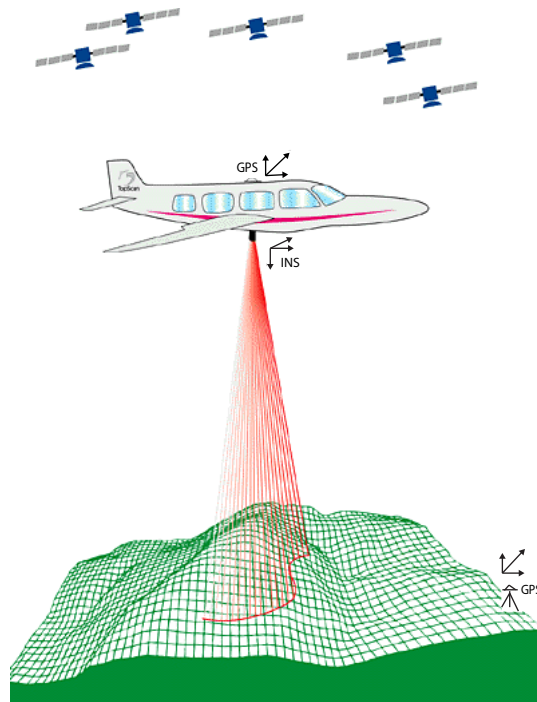


Abbildung 2.1.: Der Laserscanner im Flugzeug sendet Laserimpulse (rot) aus und vermisst so die Erdoberfläche (grün). Die Position und die Ausrichtung des Flugzeuges werden durch Vektoren symbolisiert. Sie werden einerseits durch Satelliten und GPS und andererseits durch das Trägheitsnavigationssystem (INS: Inertial navigation system) bestimmt. Quelle: Hansa Luftbild (2007).

Vom Flugzeug aus werden Laserimpulse in regelmässigen Abständen zur Erdoberfläche ausgesendet, reflektiert und wieder empfangen. Über die Laufzeit der Laserimpulse von der Aussendung bis zum Empfang der reflektierten Signale, wird die Entfernung zwischen Sensor und Geländepunkt ermittelt (Hansa Luftbild, 2007). Als Ergebnis liefern diese Messungen 3D Punktwolken, wobei jeder x, y Koordinate eine Höhe z zugeordnet wird. Aus dieser Information können durch geeignete Methoden und Filtertechniken verschiedene Rastermodelle abgeleitet werden (Wagner et al., 2004). Eine Charakteristik dieser Messmethode ist der Empfang von Mehrfachreflexionen. Je nach Anwendungszweck wird die erste (First Echo) oder die letzte (Last Echo) Reflexion verwendet. Für das digitale Oberflächenmodell (DOM) inklusive Gebäude und Vegetation wird die erste Reflexion und für das digitale Geländemodell (DGM) ohne Vegetation und Gebäude die letzte Reflexion verarbeitet (Landesvermessungsamt Nordrhein Westfalen, 2007).

2. Grundlagen

Das Laserscanning hat sich als Methode zur Erfassung der Topographie etabliert. Folgende Vorteile bietet das Laserscanning (Pfeifer, 2003):

- Durchdringen der Vegetation und Erfassen der Bodenoberfläche in bewaldeten Gebieten (gut bei Laubwald im unbelaubten Zustand, Probleme bei Nadelwald).
- Hoher Automatisierungsgrad (vom Flug bis zum DGM).
- Hohe Punktdichte ermöglicht eine sehr genaue Beschreibung des Geländes.
- Hoher räumlicher Auflösungsgrad und grosse Genauigkeit.

Neue Laserscanner, sogenannte Full-Waveform Laserscanner, erfassen nicht nur die erste und letzte Reflexion und somit die 3D Koordinaten, sondern auch die Impulsamplitude, die Impulsbreite und die Anzahl der Impulse. Auf diese Weise kann man zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation unterscheiden. Die so klassierten Vegetationspunkte (Bäume und Büsche) kann man als Parameter auf bestehende Filteralgorithmen anwenden. Dadurch wird auch das resultierende DGM verbessert (Ducic et al., 2006).

Aus einem DGM lassen sich verschiedene Derivate generieren. Die Schräglightschattierung (siehe Abschnitt 4.2) ist ein Beispiel (Abb. 2.2). Es lassen sich aber auch Hangneigung, Exposition oder Krümmung aus dem DGM bestimmen.

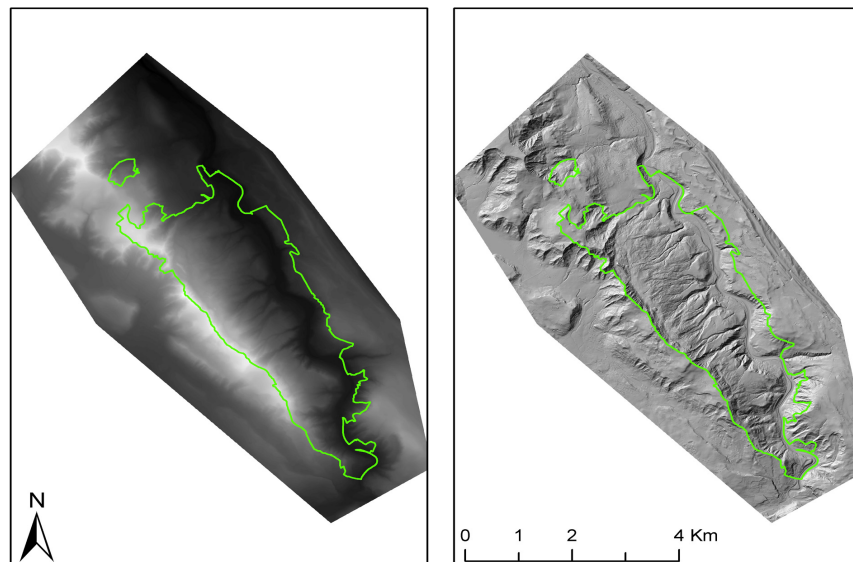


Abbildung 2.2.: Links: Digitales Geländemodell aus den Laserscan-Daten mit dem Untersuchungsgebiet Sihlwald (grün umrandet). Rechts: Schräglightschattierung des DGM.

2.2. Geomorphologie und geomorphologische Karten

Die Geomorphologie ist die Lehre von den Formen der Erdoberfläche und den Kräften und Vorgängen, die sie schaffen und geschaffen haben (Kienholz, 1998). Endogene (Gebirgsfaltung oder Erdbeben) und exogene (klimatische Ereignisse oder menschliche Einflüsse) Ereignisse tragen zur Formentstehung und -entwicklung (Geomorphogenese) bei. Die Geomorphogenese steht seit den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts im Mittelpunkt, während im 19. Jahrhundert die Geomorphographie (Formbeschreibung) und Geomorphometrie (Formmessung) im Vordergrund standen (Leser, 2003).

Die geomorphologische Karte stellt in erster Linie einen für Fachleute konzipierten Informationsträger dar. Die Aufgabe der Geomorphologie ist es aber auch, das Datenmaterial fachfremden Nutzern und sogar Laien zugänglich zu machen. Die Ansprüche der Gesellschaft an Naturpotenzial und Raum haben dazu geführt, dass die Verhinderung von unkontrollierten Eingriffen in die Natur zu einer grossen Herausforderung geworden ist. Die Umweltwissenschaftler sind aufgerufen, durch die Bereitstellung von Basisdaten, Informationen und Forschungsergebnissen Entscheidungshilfen zu geben. Der Geomorphologie obliegt es, das Relief und die geomorphologischen Prozesse zu erfassen und zu präsentieren. Der Inhalt der geomorphologischen Karte und die darin enthaltenen Aussagen sind wichtige wissenschaftliche Grundlagen. Potenzielle Nutzer sind häufig nur an Einzelparametern oder Teilaspekten interessiert. Es ist somit von Bedeutung, dass die Daten einfach und in benutzerfreundlicher Form angeboten werden. Informationen aus der geomorphologischen Karte kombiniert mit Daten aus der Physiogeographie können für die Beurteilung eines Geosystems von Bedeutung sein (Barsch und Mäusbacher, 1980).

Leser und Stäblein (1975) haben in den 1970er Jahren ein Konzept mit Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten im Massstab 1: 25'000 (GMK) entwickelt. Aufgrund der unterschiedlichen Massstäbe und der verschiedenen Inhalte waren Vergleiche unter den Karten oder Auswertungen vorher nicht möglich oder erschwert. Ziel der Legendenkommission war es, die Legende zu vereinheitlichen, flexibel zu gestalten und als Baukasten aufzubauen. Damit ist es möglich, verschiedene Elemente zu kombinieren. Zweck der geomorphologischen Karte im grossen Massstab ist in erster Linie eine Bestandesaufnahme. Die geomorphologischen Sachverhalte und Faktoren, die für eine Interpretation und Inwertsetzung des Reliefs relevant sind, sollen flächendeckend und in einer hinreichend topographischen und

2. Grundlagen

sachlichen Differenzierung dargestellt werden. Folgende Hauptinformationen sollte die Karte beinhalten (Leser und Stäblein, 1975):

- Relief (Geomorphographie, Geomorphometrie): Reliefeigenschaften, -elemente, -formen.
- Oberflächennaher Untergrund (Geomorphostruktur): Substrat.
- Geomorphogenese und Geomorphodynamik: Areale der Prozessbereiche, Erosions- und Akkumulationsbereiche, Spuren fossiler Prozesse, aktuelle und rezente Prozesse, Gewässer, Grundwasser.

Diese Darstellungsmittel sollten gewählt werden (Leser und Stäblein, 1975):

- Prozessbereiche, Gewässer: Signaturfarben.
- Wölbungen: Linien, Punktsignaturen.
- Kanten, Stufen: Zackensignaturen.
- Kleinstformen: Einzelsignaturen.
- Substrat: Signaturmuster auf Flächen, die mit gerissenen schwarzen Linien umrandet werden.
- Prozesse, Datierung, quantitative Angaben: Symbole, Ziffern.

Natürliche Prozesse wie Erdbeben, Murgänge, Felsstürze usw. sind alles geomorphologische Prozesse. Die geomorphologische Karte müsste demnach eine Grundlage bieten, um Naturgefahren, die aus solchen Prozessen resultieren, zu beurteilen. Folgende Beiträge können von der Geomorphologie gemacht werden (Kienholz, 1980):

- Erarbeitung von Grundlagenkarten zur Gefahrenkartierung.
- Gefahrenbeurteilung und Durchführung der Gefahrenkartierung.
- Erarbeitung von Entscheidungshilfen zur Gefahrenbeurteilung.

Die Geländeanalyse ist dabei ein Grundpfeiler für die Beurteilung von Naturgefahren. Angaben über die aktuelle Geomorphodynamik, aber auch andere geomorphologische Prozesse sind ebenfalls von Bedeutung. Wichtige Angaben für die Gefahrenbeurteilung sind (Kienholz, 1980):

- Hangneigung

- Kanten, Kleinformen
- Oberflächennahes Substrat
- Geomorphologischer Prozess
- Gewässer

2.3. GIS in der Geomorphologie

Anlässlich der Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG) vom 21. Juni 1991 wurde über die Simulation von geomorphologischen Prozessen, den Einsatz von GIS und digitalen Geländemodellen diskutiert (Kienholz und Haeberli, 1992).

GIS Technologien sind wichtige Werkzeuge für die Modellentwicklung und -anwendung in der Geomorphologie geworden. Einsatzgebiete von geographischen Informationssystemen in der Geomorphologie reichen von der Erkennung von Landschaftsformen bis hin zur Beurteilung von Grundwassergefahren. Wesentliche Fortschritte liegen im Einsatz digitaler Höhenmodelle, die für die Erkennung von geomorphologischen Reliefeinheiten verwendet werden (Dikau, 1993).

Für den Aufbau eines Datenmodells und des entsprechenden Legendenkonzeptes einer geomorphologischen Karte ist es wichtig, eine massstabsabhängige geomorphometrische Theorie zu konzipieren. Die geomorphometrische Klassifikation und die Darstellung von Oberflächenformen bedürfen des Zusammenwirkens von Form und Prozess auf verschiedenen Massstäben. Das führt dazu, dass bestimmte Attribute für verschiedene Hierarchiestufen relevant sind. Zum Beispiel fürs Mikrorelief (1: 5'000) sind folgende Attribute als Basis für weitere Analysen wichtig: Grösse, Form, Hangneigung, Exposition, Krümmung.

Der Einbezug der Zeit in räumliche Modelle der geomorphologischen GIS Applikationen ist noch unterentwickelt. Zeit meint hier den Ablauf der verschiedenen Prozesse und Faktoren an einem Ort. Anwendung finden diese Modelle in Gefahrenkarten und räumlichen Risikobeurteilungen (Dikau, 1993).

Die Anwendung von GIS in der geomorphologischen Forschung bietet die Möglichkeit zur Analyse und Evaluierung der Daten. Diese Daten können dann für

2. Grundlagen

die Lösung von Planungsproblemen, die Beurteilung von geomorphologischen Gefahren oder zum Beispiel für eine Abschätzung der Rutschungsanfälligkeit benutzt werden (Dikau, 1990).

Als aktuelles Beispiel sei das nationale Forschungsprojekt GISALP erwähnt. Das GISALP ist ein raum-zeitliches Geo-Informationssystem, das als Instrument für Kommunikation, Analyse, partizipative Planung und Management dienen soll. Durch die Synthese aus einzelnen Teilbereichen wurde erstmals die Voraussetzung geschaffen, die Hochgebirgslandschaft des Oberengadins gesamthaft zu betrachten und die Reaktion auf steigende Temperaturen abzuschätzen. Mit Hilfe des GISALPs wurden Szenarien für die nächsten 100 Jahre entwickelt, welche auch Veränderungen in den geomorphodynamischen Prozessen wie Rutschungen, Murgangaktivität und Steinschlag aufzeigen (Haeberli et al., 2007).

Im Rahmen des Projektes GISALP modellierte Rothenbühler (2006) in ihrer Arbeit die heutigen und zukünftigen Verbreitungen bestimmter Landschaftsphänomene und Prozesse. Durch den Vergleich der verschiedenen Modellierungen können Veränderungsräume ermittelt und Aussagen über zukünftige Problemräume gemacht werden.

2.4. Forschungsstand

Dieser Abschnitt zeigt die Geschichte und neue Entwicklungen der geomorphologischen Kartierung und den Forschungsstand der Extraktion von Information aus Geländemodellen auf.

2.4.1. Geomorphologische Kartierung

Gemäss Embleton und Liedtke (1990) wurden und werden geomorphologische Karten noch immer hauptsächlich durch Formenaufnahme im Gelände, durch Vermessung und durch Analyse von anderem Kartenmaterial wie geologischen, hydrologischen oder historischen Karten hergestellt. Begonnen hat die Geschichte der geomorphologischen Kartierung im frühen 20. Jahrhundert, eingeleitet durch deutsche und polnische Geographen, die durch Feldbeobachtungen zum Kartenprodukt kamen. Später wurden verschiedene Kartierungssysteme vorgeschlagen, die

zu sehr heterogenen Resultaten führten. Ein anderes Problem war der Massstab. Vor den 1940er Jahren waren Feldkartierungen nur für kleine Massstäbe möglich. Erst das Aufkommen von Luftbildern ermöglichte den detaillierten Überblick über die Untersuchungsgebiete, stereoskopisches Betrachten des Geländes und den Zugang zu einer Fülle von zusätzlicher Information. Seit dem Zweiten Weltkrieg hat sich die Technologie signifikant weiterentwickelt. Die Genauigkeit der Abtastgeräte hat zugenommen, höher fliegende Flugzeuge und Satelliten wurden entwickelt und die Computertechnologie wurde so verbessert, dass die hohe Informationsmenge bewältigt werden kann (Embleton und Liedtke, 1990).

Schwierigkeiten bei der traditionellen Feldarbeit bilden vor allem die Zugänglichkeit im Gelände, der hohe Zeitaufwand bei der Feldkartierung und die damit verbundenen hohen Kosten (Jones et al., 2007). Ein weiteres Problem stellt sich, wenn das Untersuchungsgebiet, wie zum Beispiel der Sihlwald, stark bewaldet ist. Auf Luftbildern kann man die Formen und Prozesse unter dichter Vegetation kaum erkennen und auch im Gelände ist es nur sehr schwer möglich, einen Überblick über die Geomorphologie zu gewinnen.

Deswegen befasst sich die Forschung seit ein paar Jahren mit der Suche nach neuen Quellen für Geländedaten. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit Laserscan-Daten als Unterstützung zur Kartierung der Geomorphologie und Hydrologie im generellen (Jones et al., 2007; Lane und Chandler, 2003; French, 2003) und im speziellen zur Ermittlungen von Rutschungen unter stark bewaldeten Gebieten, wie zum Beispiel den flämischen Ardennen in Belgien (Van Den Eeckhaut et al. 2005; Van Den Eeckhaut et al. 2006). Dabei hat es sich gezeigt, dass Laserscan-Daten und ihre Derivate für diese Zwecke geeignet sind. Dank Laserscan-DGMs können schwer zugängliche und dicht bewaldete Gebiete eingesehen und damit der Zeitaufwand und die Kosten bei der Geländearbeit verringert werden.

2.4.2. Extraktion von Information aus Geländemodellen

Ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet ist die Extraktion von Information aus einem DGM. Das können einerseits einfache Parameter wie Schräglichtschattierung, Hangneigung, Exposition, Plan- und Profilkurvatur sein, oder aber zusammenhängende Strukturen im Gelände wie Berge, Täler oder Kreten. Ein weiterer Schritt wäre die Extraktion von geomorphologischen Formen und Prozessen. Probleme sind da-

2. Grundlagen

bei der unscharfen Definition der zu extrahierenden Objekte und die Abgrenzung der Objekte im Gelände (Brändli, 1997).

Algorithmen wurden bisher entwickelt, um Geländederivate erster Ordnung (Hangneigung, Exposition), zweiter Ordnung (Profil- und Plankurvatur) und höherer Ordnung (Fliesswege, Einzugsgebiete und Flussnetzwerke) zu berechnen (Burrough und McDonnell, 1998). Bis in die 1990er Jahre haben jedoch wenige die digitalen Höhendaten für geomorphologische Zwecke verwendet (Gardner et al., 1990). Später gab es Versuche Rutschungen mittels LiDAR-Daten zu erkennen und zu charakterisieren (McKean und Roering, 2004).

Durch den technologischen Wandel werden in Zukunft immer mehr Daten mit höherer Auflösung zur Verfügung stehen. Straumann (2005) untersuchte in seiner Arbeit zwei Prozessmodelle auf ihre Sensitivität in Bezug auf die Auflösung von neuartigen Höhendaten. Es wurden diverse Unterschiede in den Modellierungen festgestellt. Zum Beispiel wurden für gröbere Auflösungen geringere Hangneigungswerte und eine geringere durchschnittliche Hangneigung ermittelt.

2.5. Das Untersuchungsgebiet

Für das Erkennen von Formen und Prozessen im Sihlwald ist es unumgänglich, die geographische Lage, die Geologie und das lokale Klima etwas genauer zu kennen. Das Wissen über die Geschichte der Holznutzung im Sihlwald trägt auch zum Verständnis über das aktuelle Relief bei.

2.5.1. Der Sihlwald

Das Untersuchungsgebiet befindet sich ungefähr 12 km südlich von Zürich zwischen Langnau am Albis und Sihlbrugg und ist zwischen den Höhenzügen Albis und Zimmerberg eingebettet (Abb. 2.3). Der Sihlwald umfasst rund 11 km² und reicht von 450 bis 915 m ü. M. Der grösste Teil des Gebietes liegt auf der linken Talseite des engen Sihltales.

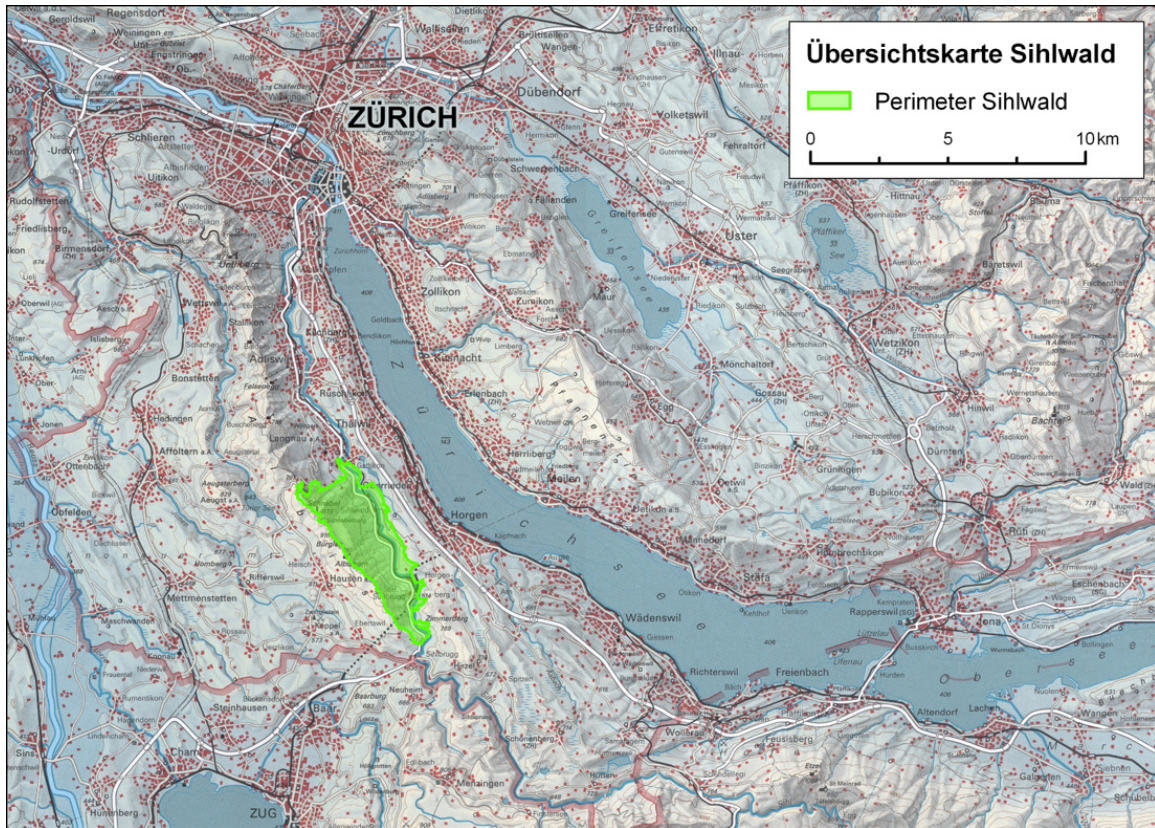


Abbildung 2.3.: Lage und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes Sihlwald in der Schulkarte des Kantons Zürich von Imhof. Quelle: GIS Sihlwald (2007).

Die starke Holznutzung (siehe Abschnitt 2.5.4) in den letzten Jahrhunderten im Sihlwald wurde ab den 1980er Jahren stark reduziert, und mit der Gründung der Stiftung Naturlandschaft Sihlwald im Jahre 1994 wurde der Sihlwald unter Schutz gestellt. Aus dem Sihlwald soll ein Naturwald entstehen, in dem die Einflüsse des Menschen auf ein Minimum reduziert werden. Der Sihlwald gilt heute als grösster zusammenhängender Laubmischwald im schweizerischen Mittelland (Abb. 2.4). Das Ziel ist es, den Besuchern Erholung und Naturerlebnis zu bieten und wissenschaftliche Forschung zu ermöglichen (Schneider, 2001).

Anfang 2008 wurde beim Bundesamt für Umwelt ein Antrag für den Aufbau eines nationalen "Naturerlebnisparks" im Sihlwald eingereicht. Bis 2009 sollte der Sihlwald das nationale Label erhalten haben (Roth, 2008). Diese Auszeichnung soll den angemessenen Schutz der Naturlandschaft Sihlwald fortführen. Dazu darf sich der Mensch zum Beispiel in der mindestens vier Quadratkilometer grossen Kernzone nur auf den Wegen bewegen (Haecky, 2007).



Abbildung 2.4.: Blick von der Hochwacht Richtung Albishorn. (Aufnahme: 27. 4. 2007)

2.5.2. Geologie

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beruhen auf den Arbeiten von Jäckli (1989), Suter (1956) und Bolliger (1999). Während des Verfassens dieser Arbeit war das Blatt Albis des geologischen Atlas' der Schweiz im Massstab 1: 25'000, bearbeitet von Thomas Gubler, noch in Bearbeitung und konnte leider nicht verwendet werden.

Die geologischen und eiszeitlichen Hintergründe sind von grosser Bedeutung für die Geomorphologie. Im Sihlwald besteht der Untergrund aus Molasse- und Moränenmaterial und in höheren Lagen treten vereinzelt Deckenschotter auf.

Die obere Süsswassermolasse, bestehend aus Nagelfluh, Sandstein und Mergel, wurde als einstige Flussablagerung des Urrheins und seiner Nebenflüsse, der sogenannten Hörnlichüttung, aus Süden nach Norden Richtung Sihlwald geschwemmt. In Alpennähe findet man bevorzugt grobe Gerölle, während im Sihlwald, der seitlich der Hauptachse der Hörnlichüttung liegt, vor allem feinkörniger Mergel und Sandstein, aber nur sehr wenig Nagelfluh vorkommen (Bolliger, 1999; Jäckli, 1989).

Die Mergel machen 40-60% der gesamten Molasse aus und sind somit die wichtigste und häufigste Gesteinsklasse der Molasse. Es ist ein sehr feinkörniges Sedimentgestein aus Ton, Kalk und Kieselsäure. Die Sandsteine sind härter und ver-

witterungsresistenter als Mergel. Sie bilden oft typische „Härtekanten“, die in den Bachtobeln als Wasserfälle in Erscheinung treten. Molassenagelfluhen treten in den alpenrandferneren Gebieten nur vereinzelt auf (Loorenkopf, Fallätsche, Üetliberg). In der Molasse sind Kalke sehr selten. Eine solche Kalkschicht ist als lokaler Leithorizont direkt über dem Sihluferweg am Westhang des Entlisberges zu finden (Jäckli, 1989).

Über der Molasse liegen flächenhafte Ablagerungen des Linthgletschers, der bei seinem Rückzug nach der Eiszeit sandig-tonige Grund- und Seitenmoränen hinterlassen hatte. Da diese schlecht wasserdurchlässig sind, entstanden im Sihlwald zahlreiche Tümpelseen und Riede (Suter, 1956).

Höherer Deckenschotter ist der älteste eiszeitliche Zeuge der Nordschweiz. Löcherige Nagelfluh ist eine ältere Bezeichnung dafür und deutet ursprünglich auf die sandfreien Partien zwischen den Geröllen hin. Dazu zählen auch die Schotter der Albiskette und des Üetlibergs, die früher zusammenhingen und sich zwischen 850 und 890 m ü. M. befinden. Die Löcherige Nagelfluh gehört nicht zur Molasse, weil sie nicht direkt den Mergeln und Sandsteinen aufliegt, sondern einer lehmigen Grundmoräne. Die Geröllzusammensetzung entspricht nicht jener der Molassenagelfluh der Hörnlichüttung (Gerölle aus der ostalpinen Decke Graubündens), sondern enthält auch Gerölle aus den helvetischen Alpen des Glarnerlandes und der Innerschweiz. Zudem fehlen Drucklösungsspuren, sogenannte Eindrücke, und die Matrix zwischen den Geröllen besteht aus grobkörnigem und uneinheitlichem Sand, was zum „löcherigen“ Aussehen führt. Entstanden sind die Deckenschotter durch die Ablagerung eines gefällreichen Flusses, beispielsweise eines Gletscherabflusses. Als es noch keinen Albis gab, konnte sich grober Schutt im Flachland ablagern, der, nachdem sich die Erdkruste gehoben hatte und die Flüsse die heutigen Täler bildeten, als Erosionsrelikt stehen blieb (Jäckli, 1989).

2. Grundlagen

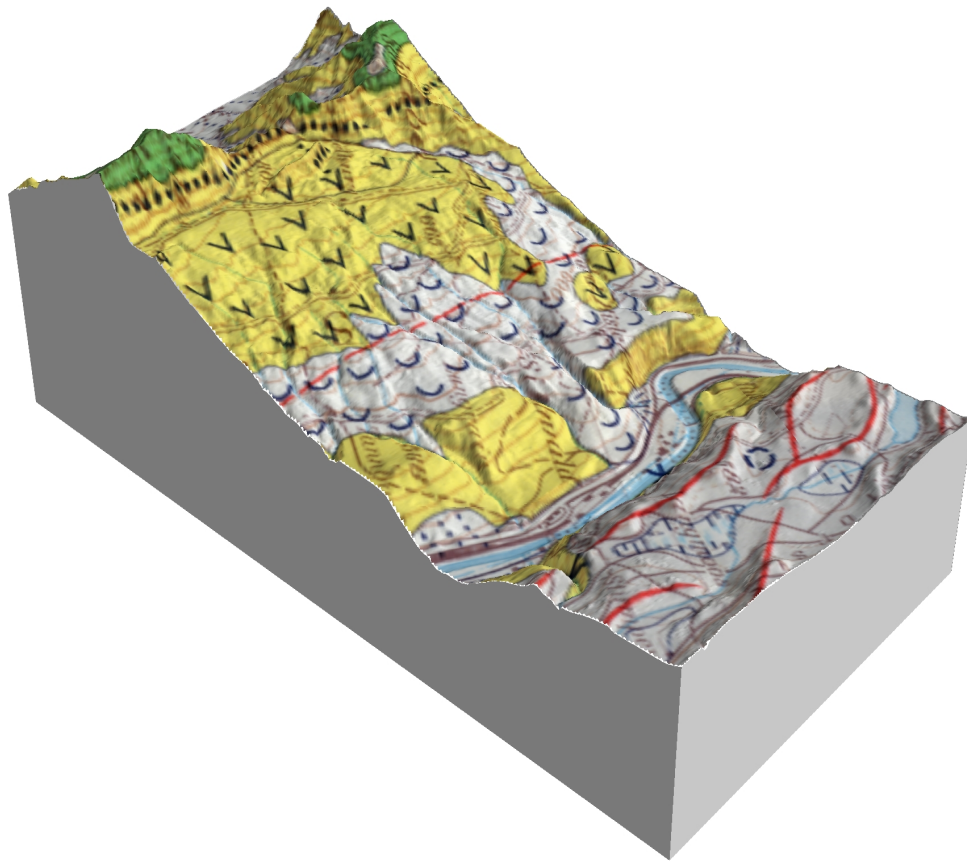


Abbildung 2.5.: Ausschnitt aus der Geologie des Sihlwaldes. Rechts der Sihl ist die Moränenlandschaft mit den Moränenkämmen zu erkennen (rote Linien). Links der Sihl sind Rutschungen und Sackungen im Molasse (gelb) und Moränenmaterial (grau) zu finden. Höhere Deckenschotter liegen der Albiskette auf (grün). Quelle: Karte Hantke und Mitarbeiter (1967).

Nach der letzten Eiszeit wurde die Landschaft durch grosse Hangrutschungen geprägt, hervorgerufen einerseits durch die Hangdestabilisierung nach dem Rückzug des Gletschers und andererseits durch die Eintiefung der Sihl und ihrer Nebenflüsse. Spätglaziale Hebungen förderten die Tiefenerosion der Sihl zusätzlich. Im unteren Talabschnitt haben viele Seitenbäche Breschen in den Albishang geschnitten, die sich im Verlauf der Zeit zu immer grösser werdenden Erosionskesseln entwickelten. Sie werden durch Felssporne, auch Eggen genannt, getrennt. Durch die Erosionsanfälligkeit liegen unten im Sihltal zahlreiche Rutsch- und Bergsturzmassen und bilden vom Eschentobelbach (ca. 2 km nördlich von Sihlbrugg) bis zum Tobelbach (nördliche Grenze des Sihlwaldes bei Langnau) eine zusammenhängende,

riesige, von vielen Wildbächen zerschnittene Sackungsmasse. Durch die Erosionskraft der Sihl ist am Albishang eine ganze Reihe von halbtrichterförmigen Anrissen entstanden (Suter, 1956).

Der Sihlwald bietet zahlreiche Aufschlüsse an den Flanken der Albiskette und am Prallhang der Sihl, wo man die obere Süsswassermolasse mit ihren horizontalen Schichten aus hartem Sandstein und weichem Mergel sehr gut beobachten kann. All diese Aufschlüsse sind auf natürliche Weise entstanden, nämlich durch Erosion fließenden Wassers. Daneben gibt es aber auch viele künstliche Aufschlüsse, zum Beispiel in Kiesgruben und Steinbrüchen oder entlang der Sihltalstrasse (Jäckli, 1989).

2.5.3. Klima

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beruhen weitgehend auf Grossmann et al. (1938) und Schmider et al. (1994).

Meteorologische Daten aus dem engeren Gebiet des Sihlwaldes gibt es nicht. Die nächstgelegenen Messstationen, die von der MeteoSchweiz berücksichtigt werden, sind Zürich, Luzern und Oberiberg. Wegen der Lage im Regenschatten des Albis sind diese Werte nur mit grösster Vorsicht zu geniessen (Schmider et al., 1994). Seit 1877 wird im Sihlwald aber eine Regenmessstation betrieben. Diese ermöglicht es, die Werte mit denjenigen von Zürich zu vergleichen. Die Werte wurden bis 1931 berechnet und man erkennt, dass die jährlichen Niederschlagsmengen im Sihlwald rund ein Fünftel höher sind als in Zürich (Grossmann et al., 1938). Zu diesem Umstand trägt nicht nur die allgemeine Nordostexposition grosser Teile des Sihlwaldes bei, sondern auch die Westwind-Leelage und die Nähe zu den niederschlagsreichen Voralpen. Aufgrund dieser speziellen topographischen Verhältnisse sind die Wäldungen von Westwindstürmen abgeschirmt (nicht aber von Föhnstürmen), leiden aber immer wieder unter übermässigen Schneefällen, was durch regelmässig wiederkehrende Einträge in den Wirtschaftsplänen belegt wird (Schmider et al., 1994).

Die Niederschläge fallen vor allem während der Vegetationszeit (Frühling, Sommer), was sich günstig auf die Wachstumsverhältnisse auswirkt. Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt in Zürich 8.5° C (Tab. 2.1). Das Klima ist mild. Es herrschen zwei ausgeprägte Windrichtungen vor. Die regenbringenden West-Südwest-Winde und die trockenen Ost-Nordost-Winde (Grossmann et al., 1938).

2. Grundlagen

Tabelle 2.1.: Vergleich der Klimabedingungen im Sihlwald und in Zürich (verändert nach Grossmann et al., 1938; MeteoSchweiz, 2007; Schmider et al., 1994).

	Sihlwald	Zürich
Niederschlag pro Jahr (1877-1931)	ca. 1300 mm	ca. 1100 mm
Niederschlag pro Jahr (1961-1990)	1200 - 1400 mm	ca. 1100 mm
Mittlere Jahrestemperatur	6 - 8 ° C	8.5 ° C
Vegetationsperiode	< 220 Tage	220 - 250 Tage

2.5.4. Geschichte der Holznutzung und des Holztransportes

Der Holzbedarf der Stadt Zürich war um 1800 relativ hoch, da Holz damals der verbreitetste Roh- und Werkstoff war (Hausbau, Möbel, Köhlerei, Rebbau, Brennholz). Die Stadt bezog ihr Holz aus den Stadtwaldungen, aus dem städtischen und aus dem freien Handel. Der Sihlwald lieferte einen beträchtlichen Teil der benötigten Holzmengen. Die Vermehrung der Bevölkerung liess den Holzbedarf immer mehr anwachsen und dabei scheint der Sihlwald übernutzt worden zu sein (Grossmann et al., 1938).

Um die enormen Holzmengen hinunter zur Sihl zu befördern, von wo sie nach Zürich geflösst wurden, hatte Ulrich Meister, Stadtforstmeister von 1875-1914, innerhalb des Sihlwaldes ein raffiniertes Transportsystem aufgebaut. Es bestand aus folgenden Transportmitteln (Abb. 2.6) (Grossmann et al., 1938):

- Waldeisenbahn als permanente Anlage oder sogenannte fliegende Geleise. Die Waldbahn diente vor allem dem Transport in Längsrichtung des Tales. Die Gesamtlänge der permanenten Anlage betrug 12 km und je nach Bedarf konnten transportable Schienen auf 14 km planierten Wegen verlegt werden.
- Holz- und Erdriesen. Diese 'Rutschen' dienten hauptsächlich der Überwindung der grossen Höhendifferenz, um das Holz in Fallrichtung des Hanges nach unten zu bringen.
- Schlittwege waren zahlreich vorhanden, bildeten aber kein zusammenhängendes System. Sie wurden je nach Gefälle im Winter und im Sommer genutzt.
- Fahrwege wurden wegen den schwierigen topographischen Verhältnissen nur sehr beschränkt gebaut.

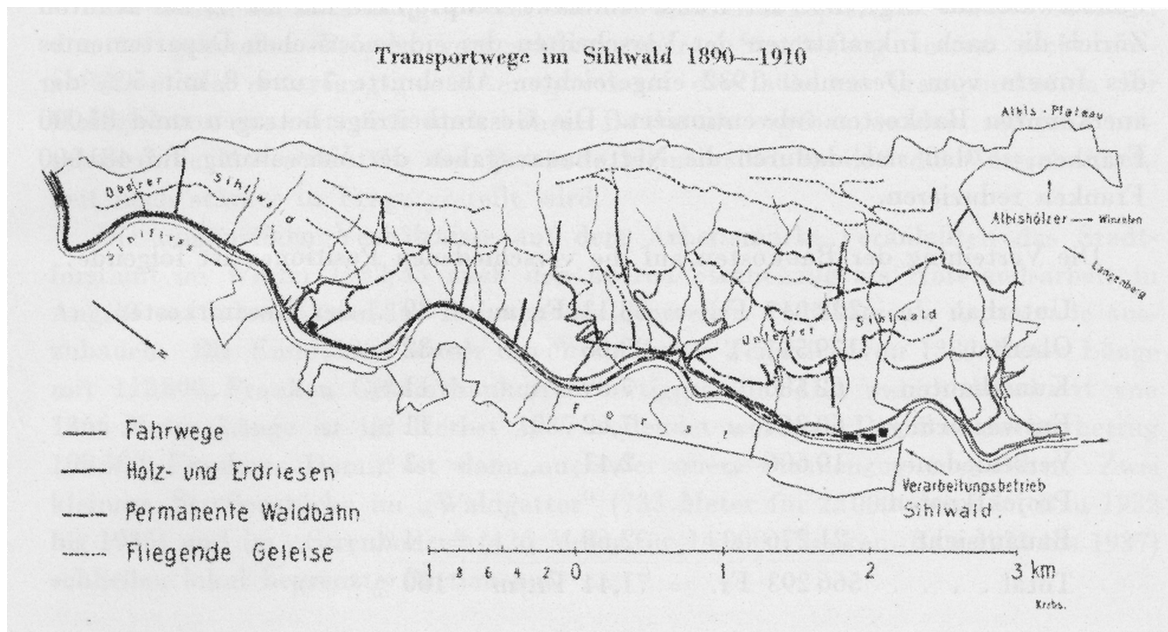


Abbildung 2.6.: Die Transportwege im Sihlwald um 1910. Quelle: Grossmann et al. (1938).

Meister hatte die verschiedenen Transportanlagen hervorragend den lokalen Geländeverhältnissen angepasst. Auffallend am Transportnetz ist der mehrmalige Umlad und die Vielgestaltigkeit der Transportmittel. Infolge der Übernutzung des Sihlwaldes und der Krise der Forstwirtschaft wurde die Waldbahn 1932 stillgelegt (Grossmann et al., 1938).

2.6. GIS Sihlwald

Das Geographische Informationssystem Sihlwald wurde kurz nach der Stiftungsgründung Naturlandschaft Sihlwald im Frühling 1994 ins Leben gerufen. Die Stiftung hat sich unter anderem zur Aufgabe gestellt, eine ihren Zielsetzungen angepasste Form der wissenschaftlichen Forschung zu ermöglichen. Ziel des GIS Sihlwald ist es, für den wissenschaftlichen Bereich Informationen rund um den Sihlwald zu integrieren und damit den Informations- und Datenaustausch zu erleichtern. Neben Metadaten und Methodenbeschreibungen enthält es auch relevante Bestimmungen und Verträge sowie ein Personenverzeichnis, das helfen soll, die richtigen Ansprechpartner und Ansprechpartnerinnen zu finden. Das System soll ein Gemeinschaftswerk aller Beteiligten darstellen und wurde deshalb auch von der Konzeption als möglichst offenes System aufgebaut (Sihlwald Data Center, 2007).

2. Grundlagen

Das Datenzentrum GIS Sihlwald existiert seit den Jahren 1999/2000 und befindet sich seit 2003 in einer Ausbauphase, in der umfangreiche Datenerhebungskampagnen durchgeführt werden. Ziel ist es, bestehende Daten zusammenzuführen und zu erneuern, neue Daten zu erzeugen und die räumlichen Daten mittels eines Geodaten-servers zentral zu speichern und bereitzustellen (Abb. 2.7) (Schmidt, 2006).

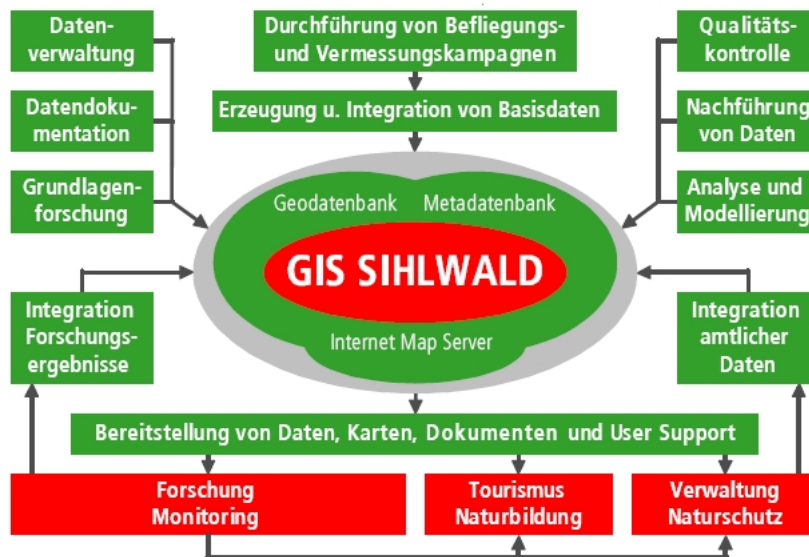


Abbildung 2.7.: Die Aufgaben des GIS Sihlwald. Quelle: Schmidt (2006).

Die räumlichen Daten werden von spezialisierten Unternehmen für das GIS Sihlwald erzeugt. Dabei kommen modernste Datenerhebungsmethoden (z.B. Laser-scanning) zum Einsatz. Die Daten stehen dann für verschiedene Forschungsprojekte zur Verfügung. Die Bereitstellung der räumlichen Daten geschieht über einen Geodaten-server, auf welchen verschiedene Nutzungsgruppen Zugriff erhalten. Dadurch können die Administration und die Abgabe vereinfacht und die Aktualität der Daten gewährleistet werden (Schmidt, 2006).

2.7. Verwendete Quellen und Daten

Für die vorliegende Arbeit wurden hinsichtlich des Formates, des Massstabes und der Aktualität unterschiedliche Quellen und Daten verwendet. Nachfolgend werden alle Quellen und Datensätze als Überblick (Tab. 2.2) zusammengefasst und beschrieben.

Tabelle 2.2.: Verwendete Quellen und Datensätze

Titel	Autor	Masstab	Datum
Feldbegehungen	M. Zuan	-	März bis Oktober 2007
Gespräch mit Forstwart	A. Gmür	-	September 2007
Gewässernetz Sihlwald	S. Fuchs, A. Linsbauer, I. Schuler	-	Juli 2005
Höhenlinien Sihlwald	R. Briegel, C. Sailer, M. Zuan	-	Juli 2005
Laserscan-DGM	TopoSys im Auftrag von GIS Sihlwald	-	20. 4. 2004
Raster-Übersichtsplan	Amt für Raumordnung und Vermessung, Baudirektion Kanton Zürich	1: 5'000	2003
Landeskarte der Schweiz (Albis, Blatt 1111)	Swisstopo	1: 25'000	2003
Inventar der Natur- und Landschaftsschutzgebiete von überkommunaler Bedeutung (Inventar80)	Fachstelle Naturschutz Kanton Zürich	1: 5'000	1997
Geologische Spezialkarte 121, Zentrale Nordschweiz	A. Isler, F. Pasquier, M. Huber	1: 100'000	1984
Inventar der geologischen und geomorphologischen Objekte des Kantons Zürich	Fachstelle Naturschutz Kanton Zürich	1: 5'000	1975/80
Geologische Karte des Kantons Zürich	R. Hantke und Mitarbeiter	1: 50'000	1967
Karte der Waldbahn	E. Krebs	1: 43'000	1936
Karte der Waldbahn	E. Krebs	1: 43'000	1910

Das wichtigste Hilfsmittel zur Erfassung der Geomorphologie und für die Digitalisierung waren die digitalen hochaufgelösten Laserscan-Rasterdaten und ihre Ableitungen (insbesondere die Schräglichtschattierung), die von einer Befliegung vom 20. April 2004 im laubfreien Zustand stammen. Die Parameter sind in der Tabelle 2.3 dargestellt.

2. Grundlagen

Tabelle 2.3.: Laserscanner-Daten (TopoSys, 2004)

Datum	20. April 2004
Flugzeit	14:49 - 17:35 UTC
Flughöhe	ca. 1250 m über Grund
Basisbezugssystem	Neues Landeskoordinatensystem der Schweiz (LV95/CH1903+)
Bodenauflösung	1 m
Höhen Genauigkeit	15 cm

Ausserdem lieferten die digitalen Inventare der Fachstelle für Naturschutz des Kantons Zürich und die geologische Spezialkarte der zentralen Nordschweiz wichtige Hinweise. Das Inventar der Natur- und Landschaftsschutzgebiete von überkommener Bedeutung (Inventar80) beinhaltet glaziologische Objekte wie Findlinge und Moränen, aber auch Feuchtgebiete. Das geologische und geomorphologische Inventar schliessen zusätzlich zu Moränen auch Rutschungen, Rundhöcker, Wasserfälle und Terrassen mit ein. In der geologischen Spezialkarte von Isler et al. (1984) findet man geologische Schichten, Schwemmfächer, Rutschungen und Riede. Der Raster-Übersichtsplan des Amtes für Raumordnung und Vermessung war hinsichtlich der anthropogenen Formen und als Feldkarte von grosser Hilfe. Digital standen zudem das Gewässernetz und die Höhenlinien des Sihlwaldes zur Verfügung.

Als Kartenmaterial wurde die geologische Karte des Kantons Zürich, die das Untergrundgestein und die Moränen umfasst und das Blatt Albis (Nr. 1111) der schweizerischen Landeskarte (LK 25) verwendet.

Ferner flossen die mündlichen Mitteilungen von Forstwart Alban Gmür und die persönlichen Erfahrungen aus den Feldbegehungen in die Karte mit ein. Auch historische topographische Karten von Dufour (1845-65), Wild (1867), Siegfried (1882) und Krebs (1910/1936) wurden hinzugezogen, ergaben aber bezüglich des Themas wenige nützliche Hinweise.

3. Geomorphologische Prozessbereiche

Geomorphologische Prozesse sind hauptsächlich Vorgänge der Erosion und Akkumulation, die im Rahmen einer klima- und landschaftsökosystemgesteuerten Geomorphogenese ablaufen und die geomorphologischen Landschaftstypen entstehen lassen (Leser, 2003). Oberflächensubstrat und Einzelphänomene geben Hinweise, welche geomorphologischen Prozesse wo aufgetreten sind und heute aktuell wirken (Geomorphodynamik). Die hydrographischen Verhältnisse steuern über die Vorfluter die Abtragungs- und Ablagerungsprozesse und sind daher von unmittelbarer Bedeutung für die Geomorphologie. Aufgrund der Reliefeigenschaften sowie der dynamischen Phänomene lassen sich Prozessbereiche abgrenzen, in denen ein Prozess vorherrschend das Georelief geprägt hat. Der Komplex eines Prozessbereiches ist als eine Gruppe von Einzelprozessen anzusehen, die dem gleichen geomorphologischen Milieu entsprechen, was mit den Begriffen fluvial, denudativ, gravitativ oder glazial angesprochen wird. Bei der Einteilung nach geomorphologischen Prozessbereichen ist keine absolut logische Systematik zu erreichen. Bei der Farbgebung stehen die geomorphodynamischen Aspekte im Vordergrund (Stäblein, 1980).

Die Einteilung und Definition der geomorphologischen Formen und Prozesse ist eines der Hauptprobleme beim Erstellen des Datenmodells und des Legendenkonzepts einer geomorphologischen Karte (vgl. Abschnitt 2.2).

Baumhauer (2006) zum Beispiel sagt, dass verschiedene Gründe dazu geführt haben, dass es derzeit in der Geomorphologie keine allgemein gültige Klassifikation von Massenbewegungen gibt. Massenbewegungen sind Hangabwärtsbewegungen, die durch die Schwerkraft hervorgerufen werden. Wasser ist hierbei nur der Auslöser oder das Schmiermittel, aber nicht das Transportmedium. Die Geschwindigkeit der Massenbewegungen kann sehr stark variieren und reicht von 1 cm pro Jahrzehnt (Hangkriechen) bis zu 100 m pro Sekunde (Bergsturz). Die Massenbewegungen können nicht nur aufgrund ihrer Geschwindigkeit, sondern auch aufgrund der Materialart und dessen physikalischer Eigenschaften unterschieden werden. Die Übergänge in Geschwindigkeit und Materialart sind jedoch oft fließend und es tre-

3. Geomorphologische Prozessbereiche

ten häufig Kombinationen der verschiedenen Bewegungstypen auf. Häufig werden sie in der deutschen geomorphologischen Literatur zu der Denudation, also den Prozessen der flächenhaften Abtragung, gezählt. Auslösende Faktoren für Massenbewegungen können endogen (Erdbeben), exogen (extremer Niederschlag) oder anthropogen (Hanganschnitt bei Strassenbau) sein (Baumhauer, 2006).

Die Nomenklatur und die Klassifizierung der geomorphologischen Formen und Prozesse richtet sich in dieser Arbeit hauptsächlich nach dem am Geographischen Institut der Universität Zürich gelehrt und verwendeten Legendenschlüssel (vgl. Rothenbühler, 2000; Koch, 2003; Beer, 2005; Imbaumgarten, 2005). Die Formen und Prozesse werden in Prozessbereiche gegliedert. Der dominante Prozess ist für die Zuteilung einer Form massgebend.

In den nächsten Abschnitten folgen Beschreibung und Charakterisierung dieser Prozessbereiche:

- gravitativer Prozessbereich
- denudativer Prozessbereich
- fluvialer Prozessbereich
- glazialer Prozessbereich
- organo-biogener Prozessbereich
- limnischer Prozessbereich
- anthropogener Prozessbereich

Im Anschluss an die Prozessbereiche werden einzelne Reliefformen, die keinem Prozess zugeordnet werden konnten, aufgelistet und beschrieben. Dazu gehören Aufschlüsse, Geländerippen, Erosionskanten und Mulden.

3.1. Gravitativer Prozessbereich

Alle geomorphologischen Prozesse laufen unter dem Einfluss der Schwerkraft (Gravitation) ab. An der gravitativen Massenbewegung sind aber auch andere Kräfte und Medien beteiligt. Das können fluviale, glaziale oder anthropogene Prozesse sein. Prozesse werden hier als gravitativ definiert, wenn sie überwiegend schwerkraftausgelöst sind. Handelt es sich bei Massenbewegungen dagegen um flächenhafte

Abtragungs- und Aufschüttungsprozesse, werden diese als Denudation bezeichnet (Leser, 2003). Zum gravitativen Bereich gehören im Sihlwald die vorwiegend gravitativ beeinflussten Flächen unterhalb des Albisgrates und folgendes Objekt:

- Bergsturzblick: Durch einen Bergsturz transportierter Block.

3.2. Denudativer Prozessbereich

Denudation bezeichnet den flächenhaften Abtrag an Hängen oder Wänden, unabhängig von der Art des geomorphologischen Prozesses, der dies bewirkt (Leser, 2003). Nebst den denudativen Flächen werden diese denudativen Formen in der Karte dargestellt:

- Rutschung: Wird allgemein als Gleitdenudation bezeichnet und gehört zu den verbreiteten gravitativen Massenbewegungen. Im Unterschied zum Bergsturz läuft die Rutschung mit geringerer Geschwindigkeit ab und das abgetragene Material bleibt weitgehend zusammen. Das Material rutscht dabei auf einer Gleitbahn zum Hangfuss, wo eine zungenförmige, konvex gewölbte Akkumulationsform mit meist rauer, welliger Oberfläche gebildet wird. Oberhalb der Gleitbahn, wo sich die Rutschung löst, entsteht eine oft halbmondförmige Abrissnische. Die räumlichen Ausmasse der Rutschung können sehr unterschiedlich sein und sie können rasch oder über längere Zeiträume (mit Übergängen zum Hangkriechen) erfolgen (Leser, 2003).
- Sackung: Gravitative Bewegungen in Festgesteinen mit einer ausgeprägten vertikalen Bewegungskomponente längs von Trennflächen. Der Übergang zu Rutschungen ist unscharf und die Wirkungsweisen sind ähnlich (Kienholz, 1998).
- Hangkriechen: Über lange Zeiträume anhaltende, langsame und meist unsteuere Verformung im Lockergestein oder Fels (Kienholz, 1998). Das flächenhaft wirkende Hangkriechen läuft langsamer und flacher als Rutschungen ab. Eine ständig hohe Bodenfeuchtigkeit ist Voraussetzung. Der Kriechprozess erfasst Tiefen von wenigen Dezimetern bis Metern, wobei die Oberfläche schneller als die Basis kriecht. Das Hangkriechen kann auch die Vegetation beeinflussen. Die Wirkung ist an der welligen Oberfläche, an den Wülsten am Hang-

3. Geomorphologische Prozessbereiche

fuss und am Fussknick der Bäume (Säbelwuchs) zu erkennen (Abb. 3.1) (Leser, 2003).



Abbildung 3.1.: Hangkriechen im Sihlwald mit Wulst am Hangfuss und Säbelwuchs der Bäume. Koordinaten LV95: E= 2'685'370 / N= 1'232'754. (Aufnahme: 13. 4. 2007)

3.3. Fluvialer Prozessbereich

Wie in Abschnitt 2.5.3 erwähnt, weist der Sihlwald relativ hohe Niederschlagsmengen auf. Daher gehört die fluviale Erosion im Untersuchungsgebiet zu den wichtigsten formbildenden Vorgängen. In diesen Bereich fallen alle Wirkungen der Flussarbeit durch Erosion und Akkumulation auf die Landformen (Leser, 2003). Desweiteren werden folgende fluvialen Formen in der Karte behandelt:

- Wasserfall: Senkrechter Abfall von Wassermassen über eine Stufe im Flussbett (Leser, 2001).
- Erosionsrinne: Rinne, die durch linearen Abtrag des fließenden Wassers entstanden ist (Abb. 3.2) (Leser, 2001).
- Erosionstrichter: Im Anrissgebiet der Erosionsrinnen geschaffene und nach unten zusammenlaufende Form. Die Anrisslinie wird durch fortschreitende Erosion nach aussen und oben versetzt, wodurch die typische Trichterform entsteht (Imbaumgarten, 2005). Sie sind im Untersuchungsgebiet je nach

Gefälle und Erosionstätigkeit des Wassers zwischen wenigen Aren und einigen Hektaren gross.



Abbildung 3.2.: Erosionsrinne im Sihlwald mit Blick abwärts. Koordinaten LV95: E= 2'684'672 / N= 1'235'175. (Aufnahme: 13. 4. 2007)

- Schwemmfächer: Akkumulationsbereich von überwiegend feineren Sedimenten eines Flusses, der dort entsteht, wo das Gefälle plötzlich nachlässt (Leser, 2001). Solche Gefällsverminderungen treten zum Beispiel beim Übertritt eines Nebenflusses auf das flache Haupttal auf. Die Fracht des Nebenflusses bleibt dann liegen und es baut sich allmählich ein kegelförmiger, flacher Schwemmfächer auf (Leser, 2003).
- Alluvialfläche: Schwemmlandbereiche, die durch frühere oder noch aktive periodische Überschwemmungen geprägt wurden (Leser, 2001). Diese ehemaligen Talböden sind flach, weisen ähnliche Längserstreckung und Gefälle wie der Flusslauf auf und grenzen sich durch einen treppenartigen Abschnitt vom Fluss ab (Leser, 2003).
- Terrassenkante: Erodierter Rand der Alluvialfläche (Leser, 2003).

3.4. Glazialer Prozessbereich

Zu diesem Bereich gehört die Formenentwicklung durch Gletscherbewegungen. Das langsam fließende Eis formte den überflossenen Untergrund (Leser, 2003).

- Moräne: Sediment und Form, die glazial entstanden und die sowohl Bestandteil rezenter Gletscher sind als auch in vorzeitlichen Glazialgebieten beobachtet werden können. Die Moräne ist das gesamte, vom Gletscher transportierte und abgelagerte Material, unabhängig von dessen Art und der Zeit der Ablagerungen bzw. Bewegung. Man unterscheidet Grund-, End-, Seiten-, Ober-, Mittel-, Ufer-, Unter- und Innenmoräne. Das Material in den Moränen ist gegenüber den meist gut geschichteten fluvialen Sedimenten unsortiert, ungerundet und ungeschichtet (Leser, 2001).
- Moränenkamm: Scharfe Kammlinie auf den wallartigen Moränen.
- Erratiker: Grobsedimentkomponenten und Blöcke, die unter eiszeitlichen Bedingungen vom Gletscher transportiert wurden. Grosse Erratiker werden Findlinge genannt (Leser, 2001). Im Sihlwald ist vor allem der rötliche Verrucano zu finden, der als Leitgestein auf den Linthgletscher hinweist.
- Rundhöcker: Längliche Hügel aus anstehendem Gestein, die auf der Luvseite Glättungen, Gletscherschliffe, Gletscherschrammen und Kritze aufweisen, die der Fliessrichtung entgegengerichtet ist. Die etwas steilere Leeseite ("Rückseite") ist durch "plucking" aufgeraut (Herausbrechen von Gesteinskomponenten durch Anfriern) (Leser, 2001).

3.5. Organo-biogener Prozessbereich

Hierzu zählen alle durch organische oder biologische Prozesse entstandenen Formen. Im Sihlwald gehören ausschliesslich Riede zu dieser Kategorie. Ihr Anteil ist durch die wasserstauende Wirkung der Grundmoräne des Linthgletschers relativ gross.

- Ried: Feuchtes, anmooriges Niederungsgebiet im Bereich hochstehenden Grundwassers oder am Rande von offenen Wasserflächen (Abb. 3.3). Meist mit der Vegetation von Sümpfen oder Mooren (Schilf, Segge, Wollgras) (Leser, 2001).



Abbildung 3.3.: Ried am Fuss des Albishangs. Koordinaten LV95: E= 2'683'333 / N= 1'234'831. (Aufnahme: 27. 4. 2007)

3.6. Limnischer Prozessbereich

Zu diesem Bereich gehören die stehenden Gewässer, die unter Süsswasserbedingungen entstanden sind. Im Sihlwald zählen nur die kleinen Weiher dazu.

3.7. Anthropogener Prozessbereich

Dieser Bereich umfasst die durch menschliches Handeln direkt oder indirekt geschaffenen, geprägten oder beeinflussten Landformen an der Erdoberfläche (Leser, 2001). Im Gebiet Sihlwald gehören Strassen, Eisenbahntrassen, Gebäude und jede durch Beton, Asphalt oder andere künstliche Materialien versiegelte Fläche dazu. Ausserdem zählen die Kiesgruben und die Abschnitte der ehemaligen Waldbahn zum anthropogenen Bereich.

3.8. Reliefformen

Reliefformen sind in dieser Arbeit Objekte, die keinem der definierten Prozessbereiche eindeutig zugeordnet werden konnten.

- Aufschluss: Ort, wo der Felsuntergrund unbedeckt sichtbar ist. Ein Aufschluss kann natürlich oder durch anthropogenen Einfluss entstanden sein (Abb. 3.4).



Abbildung 3.4.: Natürlicher Aufschluss aus Mergel und Sandstein am Albishang. Koordinaten LV95: E= 2'683'436 / N= 1'234'517. (Aufnahme: 11. 9. 2007)

- Geländerippe: Einzeln stehende Erhebung im Gelände, die keiner anderen Form zugeordnet werden kann und deren Entstehung unklar ist.
- Erosionskante: Übergangsbereich zwischen einer Geländeverflachung und ihrem Vorderabfall, wahrscheinlich durch Erosion entstanden.
- Mulde: Ringsum von ansteigenden Böschungen begrenzte, meist sehr flache Hohlform unterschiedlicher Grösse (Leser, 2001).

4. Methodik

Dieses Kapitel legt den methodischen Ablauf der vorliegenden Arbeit dar. Es zeigt den Prozess der Kartierung, der Feldbegehung und der Digitalisierung. Ausserdem wird die Analyse näher erläutert.

4.1. Geomorphologische Kartierung

Der Ablauf der Kartierung lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

1. Studium verschiedener Karten
2. Studium des Laserscan-DGMs
3. Identifizierung von geomorphologischen Hot Spots
4. Feldbegehung
5. Digitalisierung in ArcGIS

Die geomorphologische Kartierung ist ein vielschichtiger Prozess, der in mehreren Schritten erfolgt. Idealerweise beginnt man mit dem Studium des vorhandenen Kartenmaterials und verschafft sich so einen Überblick über das Untersuchungsgebiet. Danach folgt eine grobe Kartierung der auf Anhieb erkennbaren Formen (Hot Spots) und eine Eingrenzung der kartierbaren Elemente.

Die durchgeführte Kartierung in dieser Arbeit basierte primär auf der Interpretation des Laserscan-DGMs. Geländebegehungen gehörten aber dazu und dienten dem Erfassen der Geomorphologie und der Verifikation. Zusatzinformationen, wie topographische, geologische oder historische Karten wurden mitverwendet. Wie schon in der Einleitung erwähnt, sollten die geomorphologischen Formen und Prozesse im Perimeter Sihlwald flächendeckend kartiert werden. Formen, welche in den verschiedenen Karten gefunden wurden, jedoch ausserhalb des Perimeters liegen, wurden auch eingetragen, sind allerdings nicht flächendeckend und wurden im Feld nicht überprüft.

Wie bei Demel und Hauenstein (2005) beschrieben, wurde auch hier im Vorfeld der eigentlichen Kartierungsarbeit versucht, möglichst vollständige Listen für Formen

4. Methodik

und Prozesse und ihre Abgrenzungen zusammenzustellen. Im Laufe der Kartierung kamen aber immer wieder neue Erkenntnisse und Bedürfnisse hinzu, welche nach und nach in das Datenmodell integriert werden mussten.

Bei der Kartierung wurde der morphogenetische Ansatz gewählt. Das heisst, die Karte enthält nicht nur eine Beschreibung der Formen, sondern auch Informationen zu ihrer Entstehung und Entwicklung.

Die geomorphologischen Formen und Prozesse werden in der Karte als Polygone, Linien und Punkte dargestellt. Dabei wurden folgende Regeln aufgestellt:

- Polygone müssen flächendeckend sein, das heisst es darf keine Lücken zwischen den einzelnen Polygonen geben (Abb. 4.5).
- Polygone dürfen sich nicht überlappen (Abb. 4.5).
- Linien dürfen Linien oder Polygone überlagern.
- Punkte dürfen Linien und Polygone überlagern.
- Punktförmige Objekte dürfen sich nicht überlagern.
- Pro Fläche wird nur ein Prozess oder eine Form klassiert, weil es einerseits schwierig ist, mehrere Prozesse pro Fläche auf einer Karte abzubilden und es andererseits für Abfragen und Analysen in dem hier definierten Datenmodell nur eine Möglichkeit geben darf.
- Nur der dominante Prozess wird kartiert.

Bei Überlappungen oder nicht eindeutiger Zuordnung zu einem Prozess musste beurteilt werden, welche Form oder welcher Prozess den Vorrang bekommt. Als erstes erhält eine geomorphologische Form immer den Vorrang vor einem Prozess. Bei sich überlappenden Prozessen wurde der dominante Prozess, was meistens auch der aktuelle formbildende Prozess ist, kartiert. Ausnahme ist der fluviale Prozessbereich, der an den Bachtobelhängen nicht mehr aktuell ist, aber eine sichtbare Prägung hinterliess.

Folgende Hierarchie wurde festgelegt:

1. Anthropogene Formen (Strassen, Brücken, Gebäude)
2. Gewässer (Weiher, Sihl, Bäche)
3. Rutschung/Sackung

4. Ried
5. Erosionstrichter
6. Fluviale Erosion
7. Geländerippe
8. Alluvialfläche
9. Schwemmfächer
10. Glaziale Formen (Moräne, Rundhöcker)
11. Hangkriechen
12. Gravitative Prozesse
13. Denudative Prozesse

Allgemein lässt sich sagen, dass jene Formen, die zum Zeitpunkt der Aufnahme jünger und von Auge gut erkennbar waren, Priorität erhielten. Ausnahmen sind die glazialen Formen, die wegen ihrer gletschergeschichtlichen Bedeutung stärker als die gravitativen und denudativen Prozesse gewichtet wurden. Die denudativen Prozesse beinhalten in dieser Arbeit alle Flächen, die keinem anderen Prozess zugeordnet werden konnten.

4.2. Kartierung mittels Laserscan-DGM

Demel und Hauenstein (2005) bezeichnen die manuelle Luftbildinterpretation als einen anspruchsvollen Arbeitsvorgang, der eine hohe Belastung des Sehsinnes darstellt und eine hohe Konzentration erfordert. Je nach Erfahrung und Lokalkenntnissen des Interpreten sind die Formen mehr oder weniger direkt zu erkennen. Interpretieren bedeutet, dass ein Objekt erst durch zusätzliche Überlegungen oder Nachforschungen erkannt werden kann. Nicht sichere Formen müssen vor Ort verifiziert werden. Gleiches Vorgehen wurde auf die Interpretation des Laserscan-DGMs angewendet. Dabei wurden ähnliche Erfahrungen gemacht.

Bei der Interpretation wurde vor allem mit der Schräglichtschattierung gearbeitet. Die Schräglichtschattierung ist eine Darstellung des Laserscan-DGMs mit der bevorzugten Beleuchtungsrichtung Nordwest (Azimuth 315°, Sonnenhöhe 30°), wie man

4. Methodik

es auch bei der Schummerung von topographischen Karten gewohnt ist. Je nach Lage und Ausrichtung der Formen, sind diese aber bei der Standardbeleuchtung nicht oder nur unzureichend erkennbar, deswegen sollte man auch andere Beleuchtungsrichtungen ausprobieren und miteinbeziehen (Abb. 4.1 und 4.2).

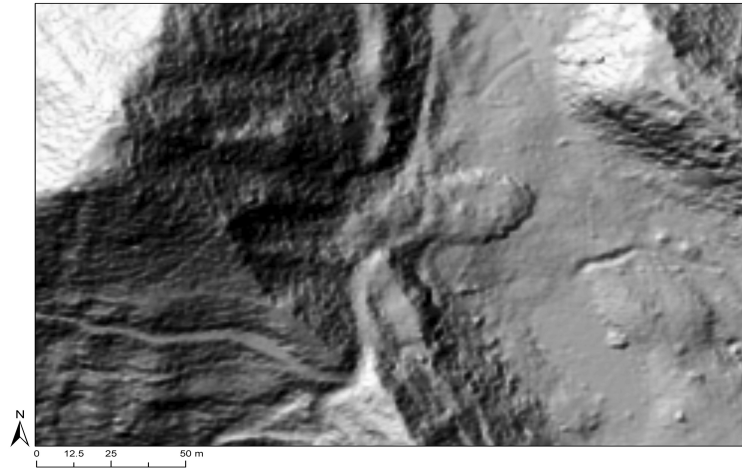


Abbildung 4.1.: Ausschnitt aus der Schräglichtschattierung mit Beleuchtung aus Nordwesten. Deutlich ist die zungenförmige Akkumulationsform einer Rutschung unterhalb der Schnabelburg zu erkennen.

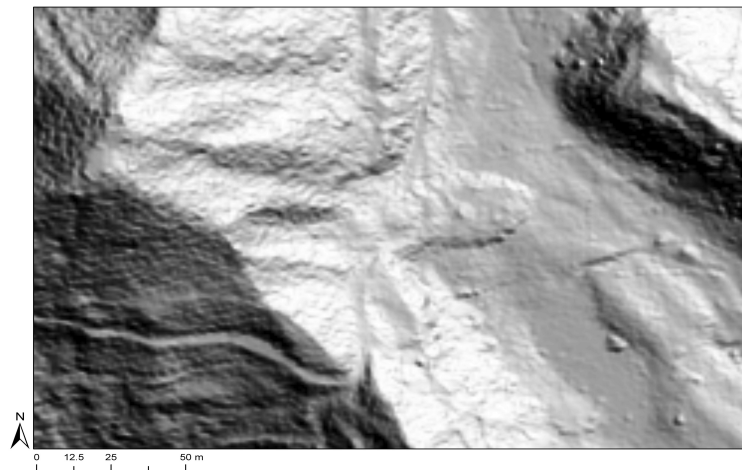


Abbildung 4.2.: Ausschnitt aus der Schräglichtschattierung mit Beleuchtung aus Nordosten. Die Anrissnische der Rutschung ist hier besser abzugrenzen (vgl. Abb. 4.4).

Andere Formen wiederum liessen sich einfacher erkennen, wenn man die Hangneigung, die Höhenlinien oder das Gewässernetz mit der Schräglichtschattierung kombinierte.

Probleme bei der Kartierung bereiteten die Artefakte in den Laserscanmodellen, die in der Schräglichtschattierung sichtbar wurden (Abb. 4.3). Aufgrund ungenügender Filterung führte Totholz oder Buschvegetation zum Beispiel an einigen Stellen zu Artefakten. Wobei man sich fragen kann, ab welchem Grad der Vermoderung Totholz zum Boden gehört. Weitere Fehler traten unter dem bewaldeten Teil (v.a. Nadelwald) des Sihlwaldes auf, welche auf zu starke Filterungsverfahren oder auf die Einstellungen des Laserscanners zurückzuführen sind.

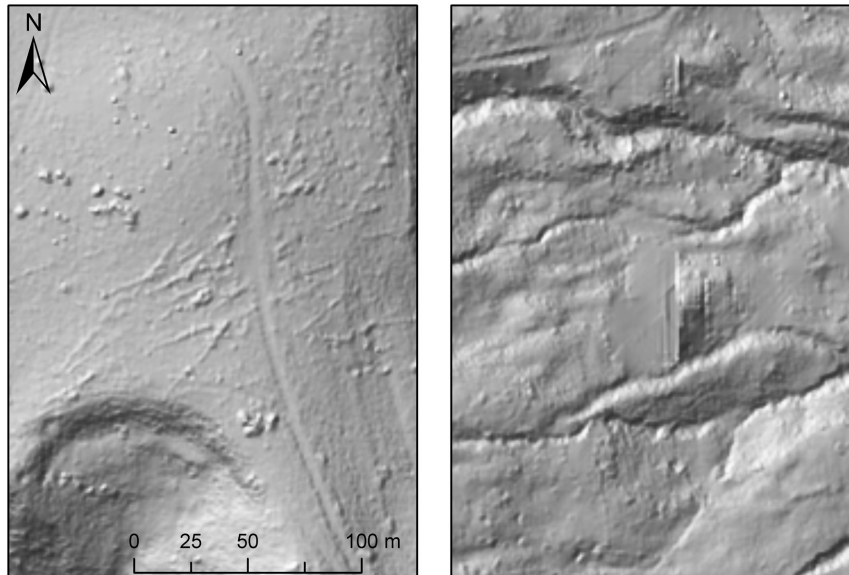


Abbildung 4.3.: Artefakte in der Schräglichtschattierung. Links: Totholz (längliche Strukturen in der Bildmitte) auf dem Albisgrat bei der Hochwacht. Rechts: Zu starke Filterung (Bildmitte) in der Nähe der Stäubiboden Hütte.

4.3. Feldkartierung

Die Feldkartierung wurde nach der Feldarbeitsmethodik von Leser (2003) realisiert. Dabei galt es, die Beobachtungen im Gelände engmaschig und wiederholt durchzuführen, damit unterschiedliche Blickrichtungen und Witterungsverhältnisse berücksichtigt werden konnten. Folgende Punkte verbergen sich hinter der Methodik (Leser, 2003):

- Übersichtsbeobachtung und Beobachtung am Einzelobjekt
- Messung von Formen und Georeliefelementen (z. B. Wölbung, Hangneigung, Länge, Breite, Höhe)
- Kartierung:
 - Formen und Georeliefelemente (Interpretation)
 - sichtbare Prozessspuren (Rutschungen, Hangabbrüche, Bodenerosion...)
 - vorzeitliche Prozesshinterlassenschaften (Moränen, Bergstürze)
- Aufnahme von Material und Materialprofilen:
 - visuell wahrnehmbare Merkmale des oberflächennahen Untergrundes (Sedimentart, Schichtung, Lagerung)
 - Probenahme an Sedimenten an natürlichen Aufschlüssen (Hangabriss, Kiesgruben) und künstlichen Aufschlüssen (Grabungen, Bohrungen)

Die Geländekartierung beginnt mit einer Übersichtsbegehung. Dabei erhält man ein Bild über die allgemeinen geomorphologischen Verhältnisse. Auf diese Fragen ist zu achten (Leser und Stäblein, 1975):

- Welche Reliefformen herrschen vor?
- Wie sind die Reliefenergie, die Hangneigung und die Talformen?
- Welche Gesteine kommen vor?
- Wie sind die Lagerungsverhältnisse und die Zusammensetzung der Gesteine?
- Wie sind die klimatischen Verhältnisse?
- Gibt es Reliefformen, die nicht mit den heute herrschenden Abtragungsverhältnissen erklärbar sind?

- Welche Vegetation kommt vor?
- Sind anthropogene Eingriffe erkennbar?

Folgende Ausrüstung wurde für diese Arbeit verwendet:

- Schräglichtschattierung Ausdruck 1: 5'000
- Raster-Übersichtsplan Ausdruck 1: 5'000
- Landeskarte der Schweiz (Blatt Albis, Nr. 1111) 1: 25'000
- Taschenmesser
- Feldbuch
- Schreibmaterial
- Digitalkamera

Die Schräglichtschattierung wurde im Massstab 1: 5'000 im A3-Format ausgedruckt und als Feldkarte verwendet. Auf 23 Einzelblättern wurde der ganze Sihlwald und seine Umgebung abgebildet. Auf der Feldkarte sind die Grenze des Sihlwaldes, das Wegnetz, das Gewässernetz und die Waldhütten zur besseren Orientierung im Gelände eingetragen (siehe Anhang A.1). Der Raster-Übersichtsplan wurde ebenfalls im gleichen Massstab und Format ausgedruckt, um eine zusätzliche Orientierungs- und Kartierungshilfe zu erhalten.

Getestet wurde auch ein Tablet PC, mit dem es möglich ist, die Formen direkt im Feld ins GIS zu digitalisieren. Er stellte sich jedoch als unpraktisch heraus, da der ständige Lichtwechsel im Wald die Sicht auf den Bildschirm erschwerte. Zudem war der Digitalisierstift zu dick, um die Formen exakt einzeichnen zu können, was eine Nachbearbeitung später im Büro nötig machte.

Mit der Digitalkamera wurden einzelne Formen photographisch festgehalten (Abb. 4.4). Die Bilder dienen der Veranschaulichung für den Kartenbenutzer. Sie wurden mittels Hyperlink in die digitale Karte eingefügt und ermöglichen einen direkten Vergleich der kartierten Form mit der realen Form. Es wurden 123 Bilder mit der jeweiligen Aufnahmezeit und -richtung in den digitalen Datensatz integriert.



(a) Rutschung an der Sihlstrasse. Koordinaten LV95: E= 2'686'256 / N= 1'231'326. (Aufnahme: 23. 8. 2007)



(b) Rutschung unterhalb der Schnabelburg. Koordinaten LV95: E= 2'682'933 / N= 1'235'242. (Aufnahme: 10. 4. 2007)

Abbildung 4.4.: Beispiele von Rutschungen im Sihlwald

4.4. Vermessung mit GPS

Es wurde der Versuch unternommen, ausgewählte geomorphologische Formen mit GPS zu vermessen, um damit die Vor- und Nachteile gegenüber der Laserscan-Kartierung zu ergründen. Verwendet wurde ein GPS-Receiver mit externer Antenne (Trimble) und die Vermessungssoftware Terrasync. Die Software GPS Pathfinder Office 3.10 wurde zur Projektplanung genutzt.

Um die bestmögliche Satellitenabdeckung nutzen zu können, wurde vorab ein Mission-Planning durchgeführt. Damit lässt sich der Stand der Satelliten zur jeweiligen Tageszeit berechnen und so die Geländebegehung optimal planen. Danach wurden die Formen im Feld vermessen und anschliessend am Computer mit der Laserscan-Kartierung verglichen.

Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der ungenügenden Satellitenabdeckung, hervorgerufen durch die dichte Vegetation (Bäume) und den Schattenwurf des Reli-

efs (Albiskette), die Formen nicht genau genug vermessen werden konnten (siehe Abschnitt 5.2.1).

4.5. Digitalisierung der Geometrie und Erstellung des Datensatzes

Digitalisiert wurde die Geomorphologie mit der Software ArcGIS 9.2 der Firma ESRI. Als Grundlage für die Digitalisierung diente die Schräglichtschattierung des Laserscan-DGMs.

Gearbeitet wurde mit dem Datenformat der Personal Geodatabase. Darin können räumliche Daten gespeichert, abgefragt und verändert werden. Diese Vektordaten werden als Punkt-, Linien- und Flächenobjekte mit ihrer Geometrie, ihren Attributen und der Topologie in sogenannten Feature-Klassen gespeichert.

Damit Abfragen eindeutig möglich sind, dürfen sich Polygone, entsprechend den Vorgaben in Abschnitt 4.1, nicht überlappen und es dürfen auch keine Lücken innerhalb oder zwischen den Flächen auftreten (Abb. 4.5). Folgende Topologieregeln wurden für die Polygone verwendet:

- Must not have gaps
- Must not overlap

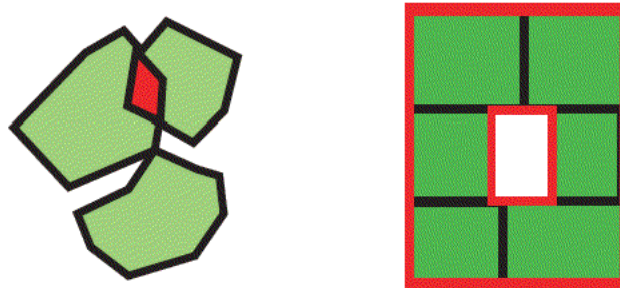


Abbildung 4.5.: Topologiefehler. Links: Überlappung (Topologieregel: must not overlap). Rechts: Lücke (Topologieregel: must not have gaps). Quelle: Demel und Hauenstein (2005).

Ausserdem dürfen keine Multipart Features vorkommen. Das heisst, die Polygone müssen zusammenhängend sein und es darf pro Polygon nur einen Eintrag in der Attributtabelle geben.

4. Methodik

Die Abgrenzung der Flächen richtete sich nach homogenen, im Laserscan oder im Gelände sichtbaren Merkmalen. Dabei waren die Oberflächenbeschaffenheit und die funktionalen Zusammenhänge zu berücksichtigen: Relief und Vegetation, geomorphologische und andere Prozesse.

Wie Stäblein (1980) in seiner Arbeit schreibt, stellt sich die Frage: Wie klein können Formen eigentlich bei der Detailkartierung sinnvoll, d.h. sachlich notwendig und graphisch möglich dargestellt werden? Aufgrund der Strichstärke des Digitalisierungswerkzeuges und den kartographischen Mindestgrößen wurden in dieser Arbeit folgende Minimumkriterien für Flächen, Linien und Punkte definiert:

- Flächen: mind. 5 m²
- Linien: mind. 5 m
- Punkte: mind. 5 m²

Der Zielmassstab für die Kartierung liegt bei 1: 5'000. Dieser feste Arbeitsmassstab soll zu einem gleichmässigen Detaillierungsgrad beitragen. Die Digitalisierung erfolgte meistens im Bildschirmmassstab 1: 1'000. Bei speziellen Objekten wurde dieser auf bis zu 1: 100 erhöht. Dabei wurde mit dem neuen Landeskoordinatensystem CH1903+ LV95 gearbeitet.

4.6. Datenmodell

Für die Darstellung geomorphologischer Formen im GIS wurde das Datenmodell des alpenweiten Forschungsprojektes HABITALP (Demel und Hauenstein, 2005), das sich auf den CIR-Luftbildkartierschlüssel des deutschen Bundesamtes für Naturschutz stützt, übernommen und im Hinblick auf die lokalen Verhältnisse angepasst.

1. In der ersten Spalte der Attributtabelle ist die ObjectID, die automatisch von ArcGIS generiert wird, angegeben.
2. Die Spalte 2 beschreibt mittels eines Codes den Form- oder Prozesstyp. Die Einteilung beruht auf den im Laserscan und auf der Feldbegehung unterscheidbaren Strukturen. Der Formencode legt die einzelnen Formen, als 4-stellige, hierarchisch strukturierte Zahlen ab (Beispiel siehe Tab. 4.1). Die vollständige Tabelle befindet sich im Anhang A.2.

Tabelle 4.1.: Hierarchische Gliederung des Formencodes

1000er Stelle	100er Stelle	1er Stelle	Beschreibung
2000			Geomorphologie
	2100		Fluvial
		2103	Schwemmfächer

3. In der 3. Spalte folgt der ausgeschriebene Name der Form, damit Fehler oder Verwechslungen minimiert werden können.
4. Der Prozessbereich wird als 2-stelliger Code dargestellt (Tab. 4.2).

Tabelle 4.2.: Prozessbereiche

Code	Beschreibung
10	Fluvial
20	Denudativ
30	Glazial
40	Gravitativ
50	Organo-biogen
60	Anthropogen
70	Limnisch
...	...
-98	nicht definierbar
-99	keine Angaben

5. Mit dieser Spalte wird das Substrat definiert (Tab. 4.3).

Tabelle 4.3.: Substrat

Code	Beschreibung
1	locker
2	fest
3	Wasser
4	Beton, Asphalt und andere künstliche Materialien
5	Mischform aus Fest- und Lockergestein
6	Organische Auflage
...	...
-8	nicht definierbar
-9	keine Angaben

4. Methodik

6. Bei flächenförmigen Objekten werden vom ArcGIS automatisch der Umfang und die Fläche aufgeführt. Bei linienförmigen Objekten nur die Länge und bei punktförmigen Objekten folgen keine weiteren Angaben.
7. Weil nicht immer alle Objekte gleich gut erfasst werden können, muss die Datenqualität spezifiziert werden. Dies geschieht mittels Code, der in der Tabelle 4.4 sichtbar ist.

Tabelle 4.4.: Datenqualität

Code	Beschreibung
1	Geometrie/Position sicher, Form/Prozess sicher
2	Geometrie/Position sicher, Form/Prozess unsicher
3	Geometrie/Position unsicher, Form/Prozess sicher
4	Geometrie/Position unsicher, Form/Prozess unsicher
...	
-8	nicht definierbar
-9	keine Angaben

8. In dieser Spalte wird die Quelle deklariert. Es sind mehrere Quellenangaben möglich.
9. Hier wird das Datum der Quelle angegeben.
10. In der letzten Spalte folgt die Universal Identification Number (UID), die es erlaubt, jedes Objekt eindeutig zu identifizieren (Tab. 4.5).

Tabelle 4.5.: Universal Identification Number

Geometrie	Code
Punkt	10'000 - 19'999
Linie	20'000 - 29'000
Polygon	30'000 - 39'000

Gemäss Angaben von Kappel und Schrefl (1996) und Zeiler (1999) postulierte Rothenbühler (2006) den Aufbau eines Datenmodells nach folgenden Merkmalen:

- Wartbar: es ist möglich, das Modell abzuändern und zu erweitern.
- Wiederverwendbar: es kann auch für andere Projekte verwendet werden.
- Verständlich: logische Namen der Objekte.

- Vollständig: es dürfen keine Formen fehlen.
- Keine Datenredundanz
- Geometrische Repräsentation: entspricht der Charakteristik der Objekte.
- Übersichtlich: möglichst wenige Beziehungen und Abhängigkeiten.

In den letzten Jahrzehnten wurde viel unternommen, um die Qualität der räumlichen Daten zu definieren. Daraus resultierte 1992 der Spatial Data Transfer Standard (SDTS) der Vereinigten Staaten (Shi et al., 2002). Dieser Standard besteht aus den folgenden fünf Punkten:

- Positionsgenauigkeit
- Attributgenauigkeit
- Abstammung
- Logische Konsistenz
- Vollständigkeit

Die ersten zwei Punkte sind im Datenmodell in den Attributtabelle unter Datenqualität zu finden. Die Abstammung ist unter der Spalte Quelle definiert. Die beiden letzten Punkte sind in den Metadaten des digitalen Datensatzes enthalten. Die Einzelheiten werden in Abschnitt 6.4 diskutiert.

4.7. Legendenkonzept

Das Legendenkonzept lehnt sich weitgehend an die geomorphologischen Kartierungen im Berninagebiet an, die am Geographischen Institut der Universität Zürich durchgeführt wurden (vgl. Rothenbühler, 2000; Koch, 2003; Beer, 2005; Imbaumgarten, 2005). Da der Legendenschlüssel für den Alpenraum konzipiert wurde, musste er für diese Arbeit angepasst und durch zusätzliche Elemente für das Mittelland sinnvoll ergänzt werden (Abb. 4.6).

Folgende Elemente der Geomorphodynamik und Geomorphogenese wurden gemäss Leser und Stäblein (1975) in die Karte aufgenommen:

- Geomorphologische Formen: Rutschung, Sackung, Schwemmfächer etc.
- Geomorphologische Prozessbereiche: Glazial, fluvial, denudativ etc.

4. Methodik

- Gewässer
- Ergänzende Angaben wie zum Beispiel Kiesgruben

Dabei wurde die Farbgebung von Leser und Stäblein (1975) angewendet (Tab. 4.6). Der vollständige Legendenschlüssel befindet sich im Anhang A.4.

Tabelle 4.6.: Farbgebung (nach Leser und Stäblein, 1975)

Form / Prozess	Farbe
Gewässer	Blau
Anthropogen	Grau
Denudativ	Ocker
Gravitativ	Braun
Fluvial	Grün
Organo-biogen	Gelb
Glazial	Violett
Reliefformen	Rosa

Geomorphologie

Fluvialer Prozessbereich

-  Fluviale Erosion
-  Erosionstrichter
-  Alluvialfläche
-  Schwemmfächer
-  Erosionsrinne
-  Terrassenkante

Glazialer Prozessbereich

-  Moräne
-  Rundhöcker
-  Moränenkamm
-  Findling

Gravitativer Prozessbereich

-  Gravitative Fläche
-  Bergsturzblick

Anthropogener Prozessbereich

-  Versiegelte Fläche
-  Kiesgrube
-  Waldbahn

Denudativer Prozessbereich

-  Denudative Fläche
-  Hangkriechen
-  Rutschung/Sackung
-  Hangkriechfront

Organo-biogener Prozessbereich

-  Ried

Gewässer

-  Weiher
-  Sihl
-  Bach
-  Wasserfall

Reliefformen

-  Geländerippe
-  Erosionskante
-  Aufschluss
-  Mulde

Abbildung 4.6.: Legende der kartierten Objekte.

4.8. Deskriptive Statistik

Nach Erstellen des Datensatzes war es das Ziel, sämtliche Rutschungen mittels der Information aus dem DGM zu beschreiben und mögliche Korrelationen mit der Hangneigung aufzuzeigen (Abb. 5.3). Der Parameter Hangneigung (slope) lässt sich im ArcGIS aus dem DGM ableiten.

Um die Verteilung der Prozesse über den Sihlwald zu eruieren, wurde als nächstes der Perimeter Sihlwald aus dem ganzen Datensatz ausgeschnitten, so dass nur das Untersuchungsgebiet mit der lückenlosen Geomorphologie übrigblieb. Mit diesem neuen Datensatz wurden anschliessend die absolute Fläche und die Anteile der verschiedenen Prozesse berechnet.

4.9. Analyse

Der gesamte digitale Datensatz wurde anschliessend genutzt, um eine quantitative Analyse durchzuführen. Zuerst wurde das Volumen der Bachtobel berechnet und anschliessend die Erosionsleistung seit der letzten Eiszeit. Die Resultate sollen einen Anhaltspunkt geben, mit welchem Umfang und mit welcher Intensität diese Vorgänge stattfanden und -finden.

Für die Berechnung galt es zuerst die Polygone der Bachtobel zu generieren (Abb. 4.7). Die meisten konnten von der Kartierung übernommen werden. Einige Polygone mussten aggregiert werden, da sie zum selben Einzugsgebiet gehören. Bei anderen war es nötig die Geometrie manuell im ArcGIS anzupassen, weil sich andere Polygone innerhalb oder am Rand der Bachtobel befanden. Anschliessend wurden alle Polygone in Linien konvertiert, die das jeweilige Bachtobel am oberen Rand vollständig umgrenzen. Dann wurden aus den Umgrenzungslinien mit Hilfe des Laserscan-DGMs 3D-Linien generiert, damit man die Höhenwerte für die Stützpunkte (Vertices) erhält.

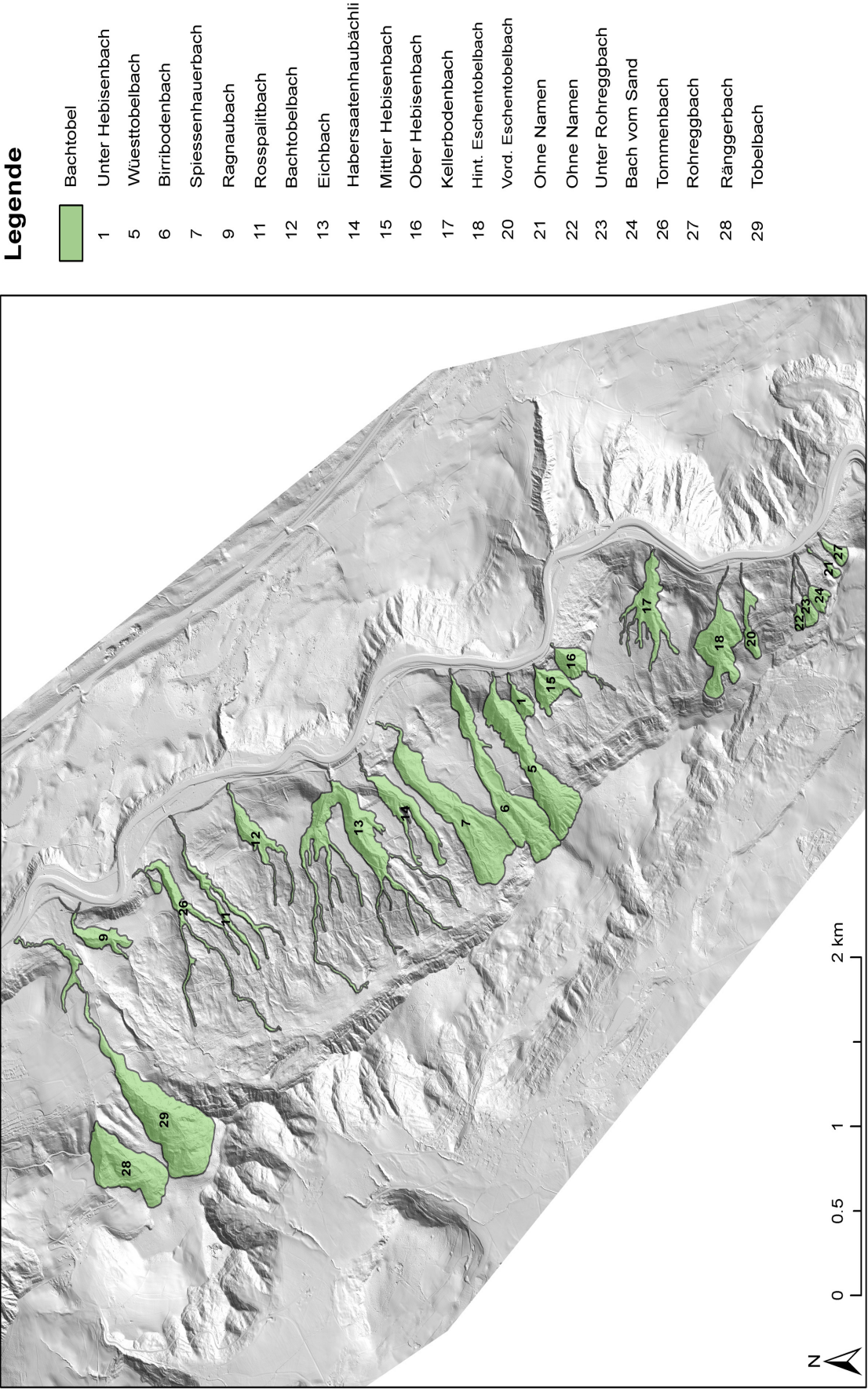


Abbildung 4.7.: Untersuchte Bachtobel.

4. Methodik

Die Vertices der Umgrenzungslinien wurden nun als Massenzpunkte für die Berechnung eines TINs (Datenstruktur, die kontinuierliche Oberflächen mit irregulärer Tessellation, basierend auf Dreiecken, modelliert (Burrough und McDonnell, 1998)) benutzt, welches die vermutete einstige Geländeoberfläche vor der Erosion der Bachtobel aufspannt. Im Anschluss wurde das TIN in ein Raster konvertiert und mit dem Laserscan-DGM mosaikiert. Sodann wurde die Höhendifferenz zwischen der vermuteten einstigen Geländeoberfläche und der heutigen Geländeoberfläche berechnet. Weil die Zellengrösse 1x1 m beträgt, entspricht die Summe der Höhenunterschiede der Volumenänderung. Mittels der Funktion 'Zonal Statistics' wurde die Volumenänderung für die einzelnen Bachtobel berechnet.

Die Abtragsrate oder Erosionsleistung wurde anschliessend mit dieser Formel ermittelt:

$$A = \frac{V}{(F \times 15'000)}$$

Die Abtragsrate wird hier als A [mm/y] abgekürzt. V [m³] steht für die Volumenänderung der Bachtobel. F [m²] ist die Fläche der Bachtobel. Diese wird, in Anlehnung an Jäckli (1989), mit 15'000 Jahren [y] multipliziert, was in etwa der Zeitspanne zwischen dem Ende des Würm-Hochglazials und heute entspricht. Nach heutigen Auffassungen müsste man mit einer Zeitspanne zwischen 19'500 Jahren (Zürich-Stadium) und 24'000 Jahren (Würm-Maximum) rechnen (Keller und Krayss, 2005).

Später wurde das Pauschalgefälle ermittelt, um einen möglichen Zusammenhang mit der Erosionsleistung aufzuzeigen. Das Pauschalgefälle ist die Neigung zwischen zwei Punkten im Gelände und wird mit folgender Formel berechnet (GITTA, 2008):

$$\tan \alpha = \frac{h}{a}$$

Die Höhe h [m] ist die Höhendifferenz zwischen dem tiefsten und höchsten Punkt eines Bachtobels. Die Länge a [m] ist die direkte Luftverbindung zwischen den beiden Punkten. Der Winkel α [°] steht für das Pauschalgefälle.

Die tiefsten resp. höchsten Punkte der Bachtobel konnten mit der Funktion 'Zonal Statistics' berechnet werden. Die Höhe ergab sich aus der Differenz. Die Längen wurden manuell im ArcGIS gemessen.

5. Resultate

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den einzelnen Forschungsfragen vorgestellt. Eine Diskussion der Ergebnisse folgt im Anschluss in Kapitel 6.

5.1. Ergebnisse der Kartierung

Forschungsfrage 1:

Welche geomorphologischen Formen und Prozesse treten im Sihlwald auf und welches sind die Hauptprozesse?

5.1.1. Datensatz

Die erhobenen räumlichen Daten werden für die weitere Forschung im Sihlwald zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund wird der flächendeckende digitale geomorphologische Datensatz im GIS Sihlwald gespeichert und verwaltet. Das Resultat sind drei Feature-Klassen, die in der Personal Geodatabase angelegt wurden. Die Feature Klassen sind nach der Geometrie der Objekte unterteilt. Sie bestehen aus punktförmigen, linienförmigen und flächenförmigen Objekten (Abb. 5.1). Separat dazu wurde eine Punkt-Feature-Klasse für die Bilder, die mittels Hyperlink in die Karte integriert wurden, eingeführt. Die Bäche wurden vom Datenzentrum GIS Sihlwald übernommen und liegen in einer separaten Feature-Klasse. Zusätzlich wurde eine Linien-Feature-Klasse für die spezielle Signatur der Umrisslinien der Erosionstrichter generiert.

Es wurden 533 Polygone, 212 Linienobjekte und 42 Punktoobjekte im Sihlwald und Umgebung digitalisiert. Die Fläche und der Anteil der einzelnen Prozesse ist in Abschnitt 5.1.3 zu finden. Der Aufbau der Karte ist so, dass die Polygone zuunterst liegen, dann folgen die Umrisslinien der Erosionstrichter, anschliessend die Bäche, darüber die Linien und zuoberst die Punktoobjekte.

5. Resultate

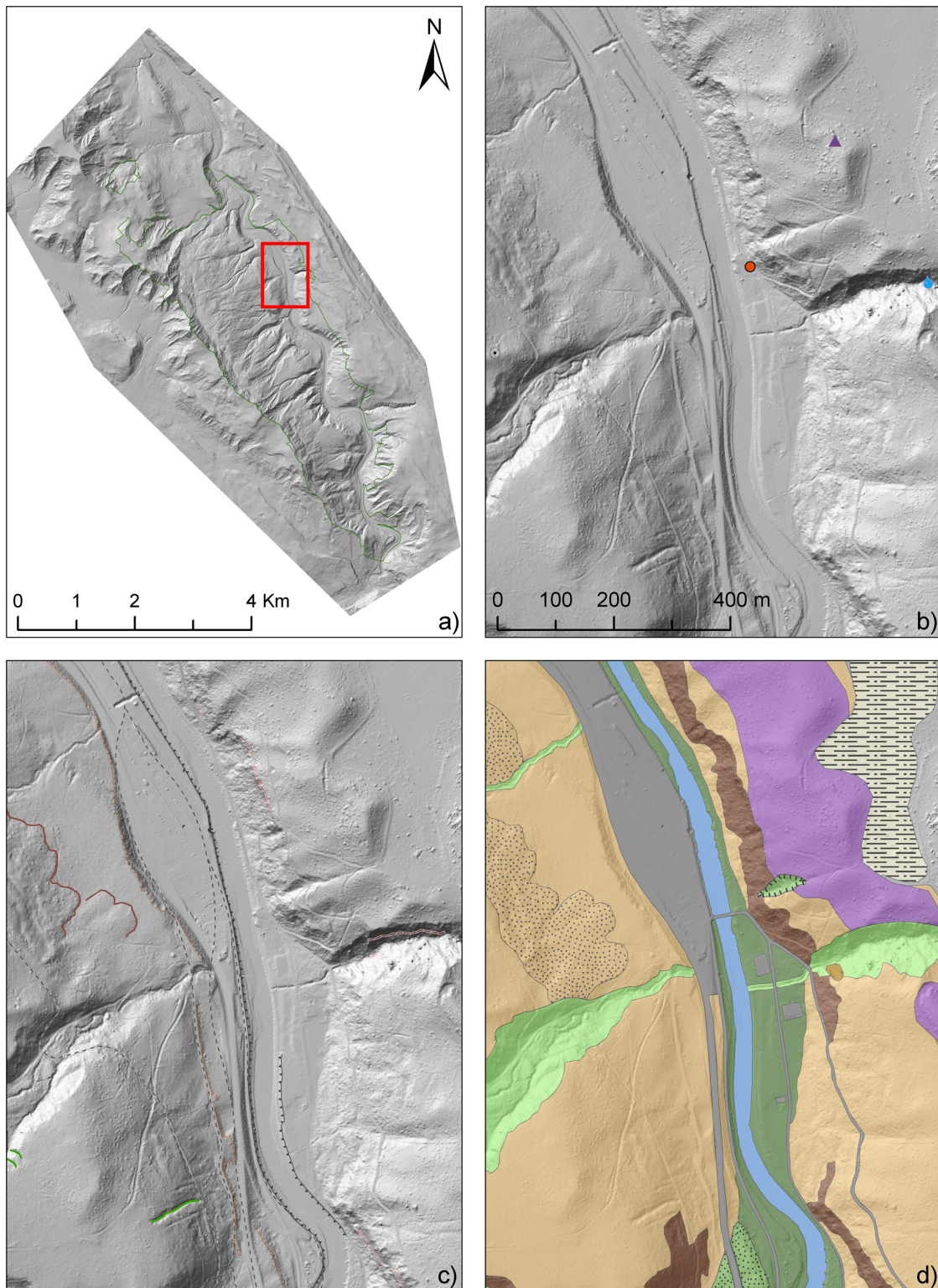


Abbildung 5.1.: Die drei verschiedenen Feature-Klassen. a) Überblick Untersuchungsgebiet. b) Punkt-Feature-Klasse. c) Linien-Feature-Klasse. d) Flächen-Feature-Klasse.

5.1.2. **Geomorphologische Karte**

Konzipiert wurde die geomorphologische Karte für den Sihlwald im Massstab 1: 5'000 (Abb. 5.2). Die Karte zeigt eine Bestandesaufnahme der Geomorphologie im Untersuchungsgebiet. Im Perimeter Sihlwald sind die Formen und Prozesse lückenlos eingezeichnet. In der angrenzenden Umgebung wurden zusätzlich die Formen erfasst, die in den verschiedenen Quellen gefunden wurden.

Von den Hauptinformationen, die gemäss Leser und Stäblein (1975) in einer geomorphologischen Karte vorkommen sollten, sind die Geomorphographie und ein Teil der Geomorphogenese ersichtlich. Die Geomorphostruktur, die Geomorphometrie und der andere Teil der Geomorphogenese sind im digitalen Datensatz in den Attributtabelle der jeweiligen Feature-Klassen enthalten (siehe Abschnitt 2.2).

Diese Karte kann als Grundlage für weitere Geländeanalysen genutzt werden. Da wichtige Angaben wie geomorphologische Prozesse, Gewässer und Kanten in der Karte und das Substrat und die Hangneigung im digitalen Datensatz vorkommen, kann sie auch als Entscheidungshilfe für eine Gefahrenbeurteilung dienlich sein.

5. Resultate

Geomorphologische Karte Sihlwald

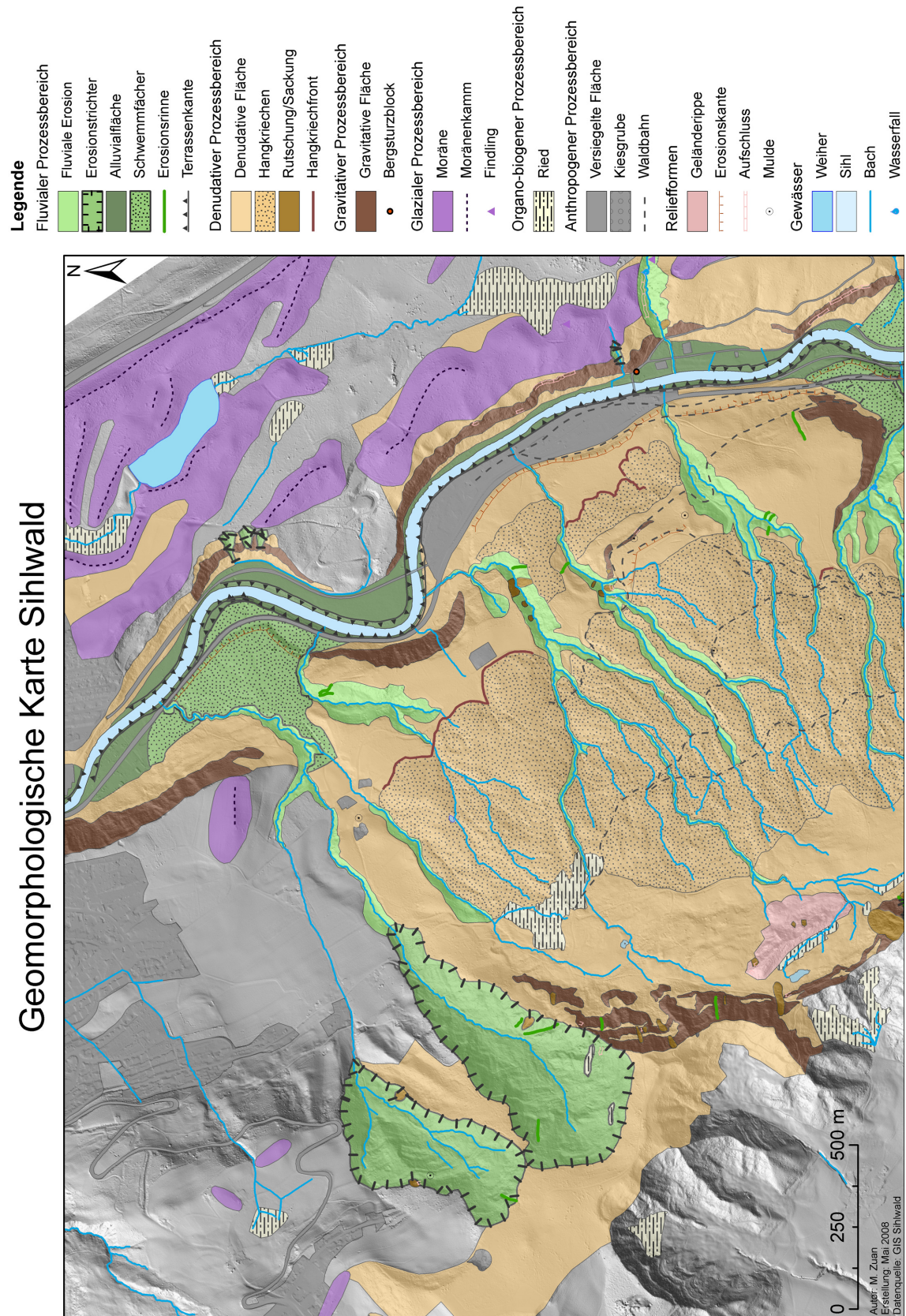


Abbildung 5.2.: Ausschnitt aus der geomorphologischen Karte Sihlwald.

5.1.3. Deskriptive Statistik

Als Derivat des DGMs wurde die Hangneigung berechnet. Am Beispiel in Abbildung 5.3 ist es möglich, die Rutschung aufgrund der Hangneigung deutlich in Abrissnische und Akkumulationsform einzuteilen. Es muss sich hier um eine relativ junge Rutschung (< 100 Jahre) handeln, da ihre Form noch gut erkennbar ist. Ältere Rutschungen im Sihlwald lassen sich hingegen kaum unterteilen. Aus diesem Grund konnte auch keine weitere Analyse hinsichtlich der Korrelation von Hangneigung und Rutschung unternommen werden.

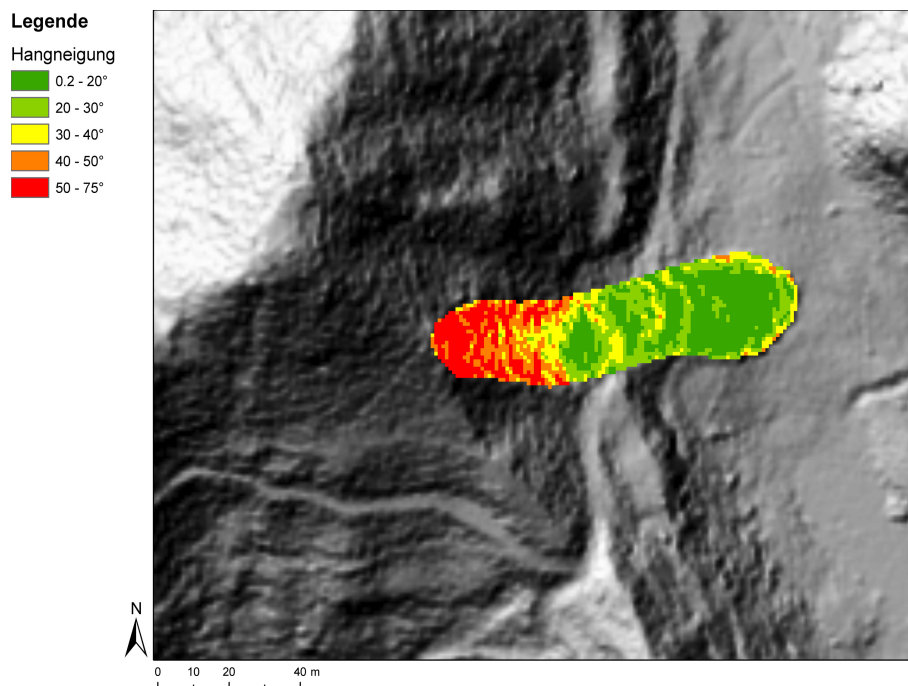


Abbildung 5.3.: Hangneigung einer Rutschung am Albishang. Deutlich ist die Abrissnische (rot) und die Akkumulationsform (grün) zu erkennen.

Desweiteren wurden die absolute Fläche und der Anteil der einzelnen Prozessbereiche im Untersuchungsgebiet Sihlwald errechnet. Dazu wurden, wie auch in der Legende (Abb. 4.6) zu sehen ist, die Formen wie folgt unter den Prozessen zusammengefasst:

- Denudativ: Denudative Fläche, Hangkriechen, Rutschung/Sackung, Gelände-
rippe
- Fluvial: Fluviale Erosion, Alluvialfläche, Erosionstrichter, Schwemmfächer,
Sihl

5. Resultate

- Gravitativ: Gravitative Fläche
- Anthropogen: Versiegelte Fläche, Kiesgrube
- Glazial: Moräne
- Organo-biogen: Ried
- Limnisch: Weiher

Tabelle 5.1.: Deskriptive Statistik

Prozess	Fläche (m ²)	Flächenanteil (%)
Denudativ	6 737 115	60
Fluvial	3 066 160	27
Gravitativ	813 622	7
Anthropogen	298 754	3
Glazial	166 413	2
Organo-biogen	94 230	< 1
Limnisch	3265	< 1
Total	11 179 559	100

Die denudativen und fluvialen Prozesse sind die dominanten Vorgänge im Sihlwald und belaufen sich auf rund 87%. 7% fallen auf gravitative Ereignisse und 3% auf menschliche Einflüsse. Obwohl das Relief des Sihlwaldes durch die Vergletscherung geprägt worden war, sind heute nur noch 2% der Fläche als glazial gestaltet erkennbar. Die meisten glazialen Formen wurden inzwischen von anderen Prozessen überprägt. Weniger als 1% machen die organo-biogenen und die limnischen Prozesse aus.

Aufgrund der geologischen und klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet, die in Abschnitt 2.5.2 und 2.5.3 beschrieben wurden, konnte diese Verteilung erwartet werden. Das relativ niederschlagsreiche Klima begünstigt den flächenhaften (Denudation) und linienhaften (fluviale Erosion) Abtrag. Die weichen und feinkörnigen Mergel erleichtern die Erosion zusätzlich. Im Vergleich zu alpinen Gebieten spielen die gravitativen Vorgänge wegen der geringeren Hangneigung eine untergeordnete Rolle. Durch den Schutzstatus und das Ziel, den Sihlwald zum Naturwald werden zu lassen, ist der Anteil der anthropogenen Formen eher gering. Die glazialen Formen verschwinden infolge Abtrag zusehends. Der Anteil der Riede und Weiher scheint gering, ist aber im Vergleich zu anderen Gebieten im Mittelland nicht unbedeutend.

5.2. Kartierung mittels Laserscan-Geländemodell

Forschungsfrage 2:

Wie lassen sich geomorphologische Formen und Prozesse aus einem Laserscan-Geländemodell identifizieren?

5.2.1. Ergebnisse der GPS-Vermessung

Um die Frage zu beantworten, welche Vorteile und Nachteile das Laserscan-DGM gegenüber dem GPS hat, wurde eine GPS-Vermessung im Feld durchgeführt. Drei Beispiele der digitalisierten Ergebnisse werden in Abbildung 5.4 dargestellt.

Die Kiesgrube konnte wegen der waldfreien Fläche im Laserscan relativ gut digitalisiert werden. Infolge der dichten Buschvegetation entlang des Kiesgrubenrandes konnte der Rand aber bei der GPS-Vermessung nicht präzise abgelaufen werden. Dadurch entstanden die kleinen Abweichungen an der Grenzlinie.

Die weiteren Beispiele konnten aufgrund der schlechten Satellitenabdeckung, hervorgerufen durch den Reliefschatten und den dichten Wald, nur lückenhaft und sehr ungenau digitalisiert werden. Es entstanden Abweichungen von bis zu 20 m.

An diesen Beispielen ist erkennbar, dass die Kartierung mittels Laserscan-DGM in dicht bewaldeten Gebieten gegenüber der GPS-Vermessung klar im Vorteil ist. Auch in waldfreien Gebieten ist der Laserscan nicht unterlegen und erreicht für die geomorphologische Kartierung eine ausreichende Genauigkeit.

Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus den Arbeiten von Van Den Eeckhaut et al. (2005) und Van Den Eeckhaut et al. (2006) (siehe Abschnitt 2.4.1). Dementsprechend konnten der Zeitaufwand und damit auch die Kosten für die vorliegende Arbeit gering gehalten werden. Die Kartierung im Laserscan-DGM wurde mit ca. 14 Arbeitstagen Feldarbeit durchgeführt.

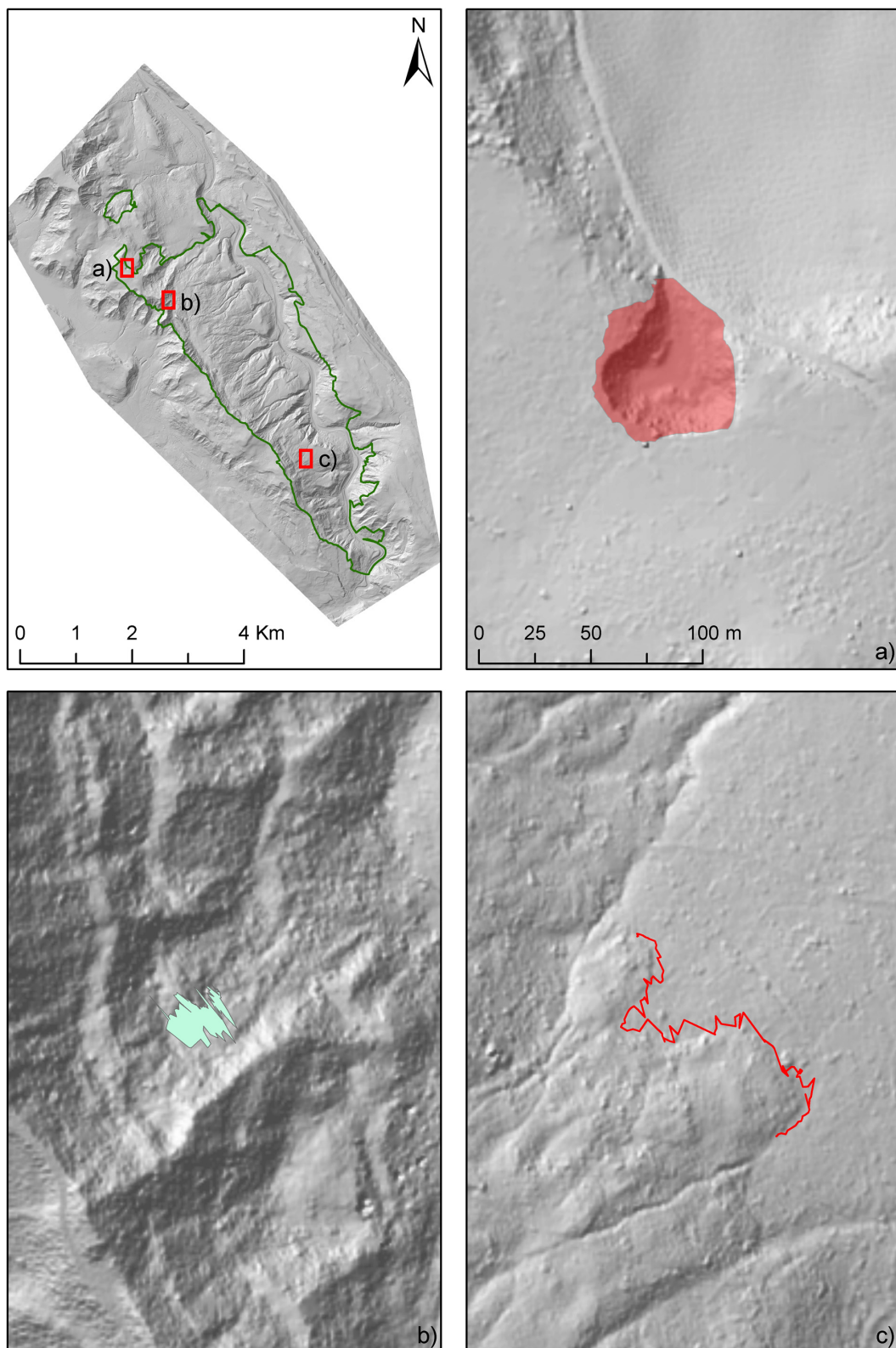


Abbildung 5.4.: Resultate der GPS-Vermessung. a) Kiesgrube (wenig bewaldet).
b) Rutschung am Albishang (stark bewaldet). c) Hangkriechfront (stark bewaldet).

5.2.2. Interpretationskriterien

Die direkten und indirekten Interpretationskriterien sollen anderen Geomorphologen oder Kartographen helfen, die Formen in der Schräglichtschattierung des Laserscan-DGMs besser und schneller zu entdecken und zu kartieren. Übernommen und angepasst wurde diese Einteilung von den "Übungen zur Fernerkundung I", die Teil der Vorlesung am Geographischen Institut der Universität Zürich sind (Itten, 2003).

5.2.2.1. Direkte Kriterien

Die direkten Interpretationskriterien sagen etwas über das Aussehen der geomorphologischen Form in einer Schräglichtschattierung aus (Tab. 5.2). Beurteilt wurden hier die Grösse, die Form und die Textur, welche sich unmittelbar aufs Objekt beziehen. Die Grösse ist in Relation zu den anderen Formen angegeben. Durch die Grundrissform lassen sich bereits viele Formen erkennen. Die Textur ergibt sich aus verschiedenen Texturkomponenten (Linien, Punkte, Streifen...).

Tabelle 5.2.: Direkte Interpretationskriterien (verändert nach Itten, 2003)

	Grösse	Form	Textur
Alluvialfläche	mittel-gross	verschieden	eben
Erosionsrinne	klein-mittel	schmal, gerade	sehr unruhig
Erosionstrichter	mittel-sehr gross	dreieckig	sehr unruhig
Findling	klein	gerundet	-
Fluss	gross	gewunden	ruhig, eben
Hangkriechen	gross	Wulst	wellig
Kiesgrube	mittel	kreisförmig	unruhig
Moräne	gross	länglich	weich
Mulde	klein-mittel	kreisförmig	-
Ried	mittel-gross	verschieden	homogen
Rutschung	klein-gross	zungenförmig	bucklig, wellig
Schwemmfächer	mittel-gross	kegelmantelförmig	fein
Versiegelte Fläche	gross	rechteckig	eben
Weiher	mittel	eher rund	homogen

5. Resultate

5.2.2.2. Indirekte Kriterien

Die indirekten Interpretationskriterien beschreiben die Umgebung der Objekte (Tab. 5.3). Dazu gehören die absolute und relative Lage eines Objekts und seine Beziehung zu Nachbarobjekten. Die Assoziation ist subjektiv und daher vom jeweiligen Interpretieren abhängig.

Tabelle 5.3.: Indirekte Interpretationskriterien (verändert nach Itten, 2003)

	Lage (absolut/relativ)	Beziehung zu Nachbarobjekten	Assoziation
Alluvialfläche	unten im Flusstal	neben Fluss	-
Erosionsrinne	am Hang	in Gesellschaft mit Erosionstrichter	grosse Neigung
Erosionstrichter	am Hang	in Gesellschaft mit Erosionsrinne	grosse Neigung
Findling	überall	in Nähe von Moränen	Verrucano
Fluss	im Tal	neben Alluvialfläche	Mäander
Hangkriechen	auf Zwischenhöhe	-	Säbelwuchs, geringe Neigung
Kiesgrube	verschieden	an Wegen	Kies
Moräne	rechte Sihlseite	-	-
Mulde	auf Zwischenhöhe	an Wegen	-
Ried	auf Zwischenhöhe	in Gesellschaft mit Weihern	-
Rutschung	Albishang, Bachtobel	-	grosse Neigung
Schwemmfächer	im Flusstal	bei Bachtobel	geringe Neigung
Versiegelte Fläche	überall	-	-
Weiher	auf Zwischenhöhe	in Gesellschaft mit Rieden	-

5.3. Ergebnisse der Analyse

Forschungsfrage 3:

Wie gross ist das abgetragene Volumen und die mittlere Erosionsleistung der Bachtobel seit dem Rückzug des Linthgletschers?

5.3.1. Volumenberechnung

Die Resultate der Kartierung wurden genutzt, um eine Geländeanalyse durchzuführen. Es wurden die Volumen für 22 Bachtobel links der Sihl errechnet. Auf den Abbildungen sind die Bachtobel vor und nach der künstlichen Auffüllung auf das vermutete einstige Niveau zu sehen (Abb. 5.5 und 5.6). Die Ergebnisse der Volumenberechnung sind im nächsten Abschnitt in der Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Berechnungen können nur ungefähr die Verhältnisse nach der Eiszeit wiedergeben. Zu viele Aspekte sind unbekannt.



Abbildung 5.5.: Ausschnitt aus der Schräglichtschattierung mit den tiefen Einschnitten der Bachtobel.

5. Resultate

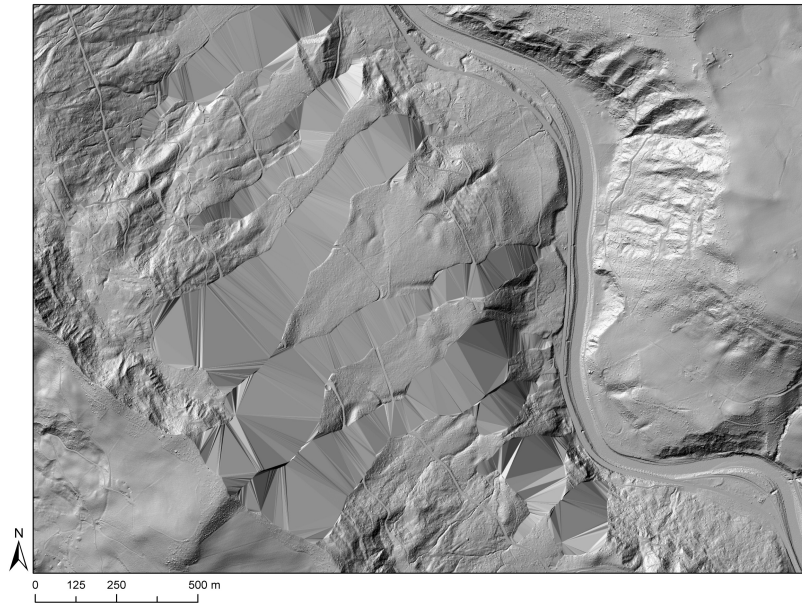


Abbildung 5.6.: Bachtobel nach dem Aufspannen der TINs im vermuteten Zustand nach Rückzug des Linthgletschers.

Die neu entstandenen Informationen können für weitere Analysen oder Vergleiche genutzt werden.

5.3.2. Erosionsleistung

In der anschliessenden Tabelle sind die Resultate der Volumenberechnung und der Erosionsleistung zusammengefasst. Die Erosionsleistung ergibt sich aus der ersten Formel in Abschnitt 4.9.

Tabelle 5.4.: Erosion der Bachtobel im Sihlwald

Bachtobel	ID	Volumen ($\text{m}^3 \cdot 10^3$)	Fläche ($\text{m}^2 \cdot 10^3$)	Erosion (mm/y)	Pauschal- gefälle (°)
Unter Hebisenbach	1	269	22	0.8	41
Wüesttobelbach	5	4'052	179	1.51	33
Birribodenbach	6	1'830	192	0.63	29
Spiessenhauerbach	7	2'210	223	0.66	23
Ragnaubach	9	413	43	0.65	14

Rosspalitbach, Hüllilobodenbach	11	225	55	0.27	17
Bachtobelbach	12	418	57	0.49	20
Eichbach, Schliffibach, Stäubibodenbach, Steinereggbach, Albishornbach	13	2'303	229	0.67	26
Habersaatenhaubächli	14	660	77	0.57	23
Mittler Hebisenbach, Eglibodenbach	15	598	49	0.81	38
Ober Hebisenbach	16	531	39	0.91	53
Kellerbodenbach, Schönbodenbach, Streubodenbach	17	561	87	0.43	27
Hinter Eschentobelbach	18	1'093	110	0.66	29
Vorder Eschentobelbach	20	159	29	0.37	34
Ohne Namen	21	29	8	0.25	45
Ohne Namen	22	41	9	0.3	55
Unter Rohreggbach	23	97	18	0.37	36
Bach vom Sand	24	149	19	0.53	36
Tommenbach, Bach von der Bürglenhalde, Bach in der Tüfels Chuchi	26	387	78	0.33	26
Rohreggbach	27	98	15	0.44	48
Ränggerbach	28	2'018	150	0.9	32
Tobelbach	29	7'001	281	1.66	20
Mittelwert				0.65	32

In der zweiten Spalte sind die Identifikationsnummern (ID) der Bachtobel aufgelistet, die zugleich als Nummerierung in der Abbildung 4.7 gelten.

Die Werte der Erosion oder der Abtragungsraten reichen von 0.25 bis 1.66 mm pro Jahr. Der Mittelwert liegt bei 0.65 mm/y. Die Standardabweichung beträgt 0.35. Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich ist, haben 20 der 22 der untersuchten Bachtobel Ab-

5. Resultate

tragungsraten zwischen 0.25 und 0.91 mm pro Jahr. Nur der Tobelbach und der Wüesttobelbach weisen mit 1.66 resp. 1.51 mm/y höhere Erosionsleistungen auf.

In der letzten Spalte sind die Pauschalgefälle der einzelnen Bachtobel eingetragen. Die Werte reichen von 14 bis 55°. Der Mittelwert liegt bei 32°. Die Standardabweichung beträgt 0.11.

Zu beachten ist, dass die Erosionsraten seit Ende der Eiszeit grossen Schwankungen unterworfen waren. Nach Rückzug des Linthgletschers im Spätglazial, als sich noch keine Vegetation entwickeln konnte, herrschten vermutlich grosse Abtragungsraten. Erst im Holozän mit dem Aufkommen der Vegetation nahmen die Abtragungsraten wahrscheinlich wieder ab.

Durch verschiedene Verbauungen bei den Seitenbächen der Sihl konnte der Abtrag nochmals reduziert werden. Durch Unwetter und Hochwasser werden aber trotzdem immer wieder Wege, Strassen und Eisenbahntrassees zerstört (Osterwalder, 2008). Als Beispiel sei hier die Rutschung über die Sihltalstrasse vom 9. August 2007 (Abb. 4.4) erwähnt, die durch die Starkniederschläge vom 8. und 9. August 2007 ausgelöst wurde.

Die berechneten Erosionsleistungen können auch als Grundlage und Entscheidungshilfe für eine Gefahrenkarte dienen.

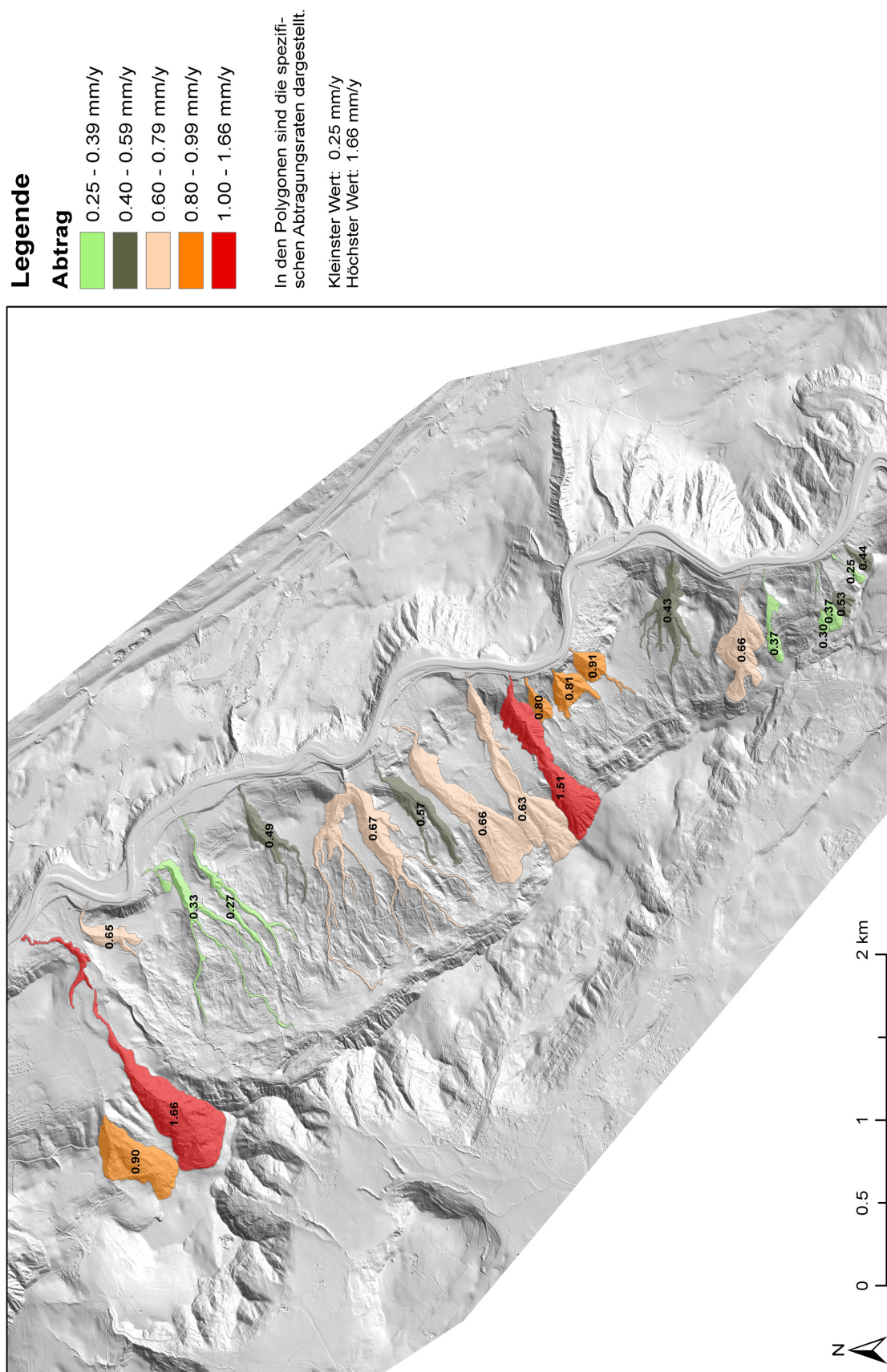


Abbildung 5.7.: Abtragungsraten der Bachtobel

5.3.3. Vergleich

Als Vergleich wurden die Berechnungen von Jäckli (1989) hinzugezogen (Tab. 5.5). Die von Jäckli untersuchten Bachtobel liegen ca. 20 km nördlich des Sihlwaldes an der Stadtgrenze von Zürich. Die Ergebnisse vom Sihlwald liegen in derselben Grössenordnung, unterscheiden sich im Einzelnen aber doch ein wenig. Der Wehrenbach und Elefantenbach zeigen die grösste Erosionstätigkeit mit 1.88 mm/y. Auch das Sagentobel und der Holderbach weisen mit 1.23 resp. 0.82 mm/y höhere Abtragungsraten als die meisten Bachtobel im Sihlwald auf.

Tabelle 5.5.: Bachtobel als Erosionsgebiete (verändert nach Jäckli, 1989)

Bachtobel	Volumen ($\text{m}^3 * 10^3$)	Fläche ($\text{m}^2 * 10^3$)	Erosion (mm/y)
Wehrenbach und Elefantenbach	37'000	1'313	1.88
Sagentobel	7'100	385	1.23
Holderbach	1'200	97	0.82

Ein weiterer Vergleich ist in Haeberli et al. (2003) zu finden. Dort beträgt die mittlere Abtragungsrate grosser Einzugsgebiete in den Schweizer Alpen 0.38 mm pro Jahr, wobei der Bereich von 0.28-0.53 mm/y reicht. Die Hälfte der untersuchten Bachtobel im Sihlwald haben gleich grosse Abtragungsraten.

Die Abtragungsraten von unverbauten Bächen im Mittelland liegen in der Grössenordnung von Gebirgsbächen (ca. 1 mm/y). Bei verbauten Bächen hingegen halbieren sich die Abtragungsraten auf ca. 0.5 mm/y. Entscheidend für die Erosionsleistung sind die Neigung des Baches, der Niederschlag und die Charakteristik des Einzugsgebietes (z. B. Material, Vegetation).

6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Methodik, die Ergebnisse der Kartierung und die Ergebnisse der Analyse kritisch hinterfragt. Es folgen eine Beurteilung der Laserscan-Interpretation und eine Betrachtung der möglichen Fehler.

6.1. Geomorphologische Kartierung

Im Gegensatz zu ähnlichen Arbeiten am Geographischen Institut der Universität Zürich wurde für die Interpretation der Geomorphologie kein Luftbild, sondern ein Laserscan-Geländemodell verwendet. Im Übrigen deckt sich der methodische Ablauf der Kartierung mit anderen Arbeiten. Durch den dichten Wald und das zum Teil schwer zugängliche Gelände war das Laserscan-DGM zugleich die einzige Möglichkeit, sich einen Einblick und einen Überblick über das Untersuchungsgebiet zu verschaffen. Eine Feldbegehung war dennoch notwendig und wurde nach der Feldarbeitsmethodik von Leser (2003) ausgeführt.

Die Resultate der Auswertung des Laserscan-DGMs und der Feldbegehung flossen in die Digitalisierung ein. Eine Schwierigkeit dabei war, verschiedene räumliche und zeitliche Skalen in die Karte zu integrieren. Wie in Tabelle 2.2 beschrieben, wurden Daten im Massstab von 1: 5'000 bis 1: 100'000 in einem Zeitraum von 1910 bis 2007 verarbeitet. Ziel war es, die Karte im Massstab 1: 5'000 auszugeben. Dazu mussten Daten im kartographisch kleinerem Massstab nachbearbeitet werden.

Schwierigkeiten bereiteten auch die Identifikation, die Klassierung und die Abgrenzung der Formen (siehe Abschnitt 2.4.2), so zum Beispiel die Einteilung der Erosionstrichter. Die meisten kleineren Erosionstrichter liessen sich ohne Probleme klassieren. Mühe bereiteten vor allem die grösseren Formen, weil sie auch unter dem allgemeinen Begriff fluviale Erosion hätten klassiert werden können. Da der Grundriss aber trichterförmig ist, wurden sie schlussendlich den Erosionstrichtern zugeteilt.

Bei den Rutschungen bestand die Hauptproblematik darin, dass ältere Rutschungen (> 100 Jahre) auf der Schräglichtschattierung kaum erkennbar waren, weil sie bereits erodiert sind. Auch im Feld waren sie kaum zu entdecken, da sie meist von

Vegetation bedeckt sind. Aus diesen Gründen konnte die Einteilung in Anriss- und Akkumulationsgebiet und die zu Beginn angestrebte Analyse über die Korrelation von Hangneigung und Rutschungen nicht realisiert werden.

Das Hangkriechen war ebenso schwer zu beurteilen. Zwar konnte die Hangkriechfront in der Schräglichtschattierung und im Gelände anhand typischer Wulste ziemlich gut ausgemacht werden. Und auch der charakteristische Säbelwuchs der Bäume war im Feld relativ gut zu erkennen. Es stellte sich aber die Frage, bis zu welcher Höhenlage Hangkriechen stattfindet. Die Einordnung erfolgte aufgrund der Textur in der Schräglichtschattierung.

Eine weitere Herausforderung war die Unterscheidung der Prozessbereiche 'gravitativ' und 'denudativ'. Hierzu wurden Flächen mit Hangneigungen unter 30° zu den denudativen und Flächen über 45° zu den gravitativen Vorgängen gezählt. Im Bereich zwischen 30° und 45° fand die Zuteilung aufgrund der Beobachtungen im Gelände statt.

6.2. Beurteilung der Laserscaninterpretation

In der nachfolgenden Tabelle wurde beurteilt, wie gut sich die einzelnen geomorphologischen Formen aus der Schräglichtschattierung erkennen lassen.

Die zweite Spalte beschreibt, wie gut oder wie schlecht die Formen visuell in der Schräglichtschattierung erkennbar sind. Die Bewertungen sind: gut, genügend, ungenügend, gar nicht. Die dritte Spalte zeigt, woran sich der Interpret orientieren kann, um eine Form zu entdecken. In der vierten Spalte sind Anhaltspunkte aufgelistet, die das Auffinden der Formen im Gelände erleichtern. Die letzte Spalte gibt an, welche Quellen ausserdem von Nutzen sind.

Tabelle 6.1.: Beurteilung der Laserscan-Interpretation

Form / Prozessbereich	Wie gut erkennbar in der Schrägllichtschattierung?	Wie erkennbar in der Schrägllichtschattierung?	Wie erkennbar im Gelände?	Zusatzinformation
Alluvialfläche	genügend	Fläche beidseits Fluss	Fläche beidseits Fluss	Gewässernetz
Aufschluss	gar nicht	unmöglich	Untergrund sichtbar	geologische Karte
Bergsturzblock	ungenügend	fast nicht möglich, zu viele Artefakte	einzelnen stehender Block, ungerundet	geologische Karte
Erosionsrinne	gut	längliche steile Eintiefung	längliche steile Eintiefung	Höhenlinien
Erosionstrichter	gut	dreiecksförmige Eintiefung	dreiecksförmige Eintiefung	Höhenlinien
Findling	ungenügend	fast nicht möglich, zu viele Artefakte	einzelnen stehender Block, gerundet	geologische Karte
Fluss	gut	feine, gewundene Oberfläche	fließendes Wasser	Gewässernetz
Geländerippe	gut	einzelnen stehende Erhebung	einzelnen stehende Erhebung	Höhenlinien
Hangkriechen	genügend-gut	bucklig, wellig	Säbelwuchs	Höhenlinien
Kiesgrube	gut	rundliche Einbuchtung	rundliche Einbuchtung	Landeskarte der Schweiz
Moräne	gut	längliche Erhebung	längliche Erhebung	geologische Karte
Mulde	gut	runde Vertiefung	runde Vertiefung	Höhenlinien
Ried	ungenügend	feine Textur	typische Pflanzen	Luftbilder
Rundhöcker	gut	rundliche Erhebung	rundliche Erhebung	geologische Karte
Rutschung / Sackung	neu: gut, alt: ungenügend	sichelförmiger Anriss, unten zungenförmig	sichelförmiger Anriss, unten zungenförmig	Übersichtskarte

6. Diskussion

Schwemmfächer	gut	kegelmantelförmig	kegelmantelförmig	geologische Karte
Terrassenkante	gut	plötzlicher Abhang	plötzlicher Abhang	-
Wasserfall	gar nicht	nicht möglich	Bach, Getöse	Gewässernetz
Weiher	gut	eben	offene Wasserfläche	Gewässernetz
Anthropogener Prozessbereich	gut	rechteckige Formen	versiegelte Flächen	Übersichtsplan
Denudativer Prozessbereich	genügend	Hangneigung < 30°	flache Hänge	Hangneigung, Höhenlinien
Fluvialer Prozessbereich	gut	steile Einschnitte um Bach	Flanken im Bachtobel	Gewässernetz
Glazialer Prozessbereich	genügend	Erhebungen	weiche Erhebungen	geologische Karte
Gravitativer Prozessbereich	genügend	Hangneigung > 45°	steile Hänge	Hangneigung, Höhenlinien
Limnischer Prozessbereich	genügend	ebene, rundliche Formen	offene Wasserfläche	Gewässernetz
Organo-biogener Prozessbereich	ungenügend	fast nicht möglich	typische Pflanzen	Luftbilder

Die Hälfte der kartierten Formen und Prozesse lassen sich gut aus der Schräglightschattierung erkennen. Hinzu kommen sechs Formen, die sich "genügend" ausfindig machen lassen. Daneben gibt es fünf Objekte, die sich nur "ungenügend" und zwei, die sich "gar nicht" in der Schräglightschattierung identifizieren lassen. Die wichtigsten zusätzlichen Hilfsmittel sind das Gewässernetz, die Höhenlinien, die Hangneigung und die geologischen Karten. Natürlich ist die Beurteilung subjektiv und hängt von der Erfahrung des Interpreten ab.

Die Stärken des Laserscan-DGMs für die geomorphologische Kartierung umfassen:

- Hohe räumliche Auflösung. Dadurch ist das Erkennen von Kleinformen und eine genauere Abgrenzung möglich.

- Gute Übersichtskarte. Dient der besseren Orientierung und Kartierung im Gelände.
- Durchdringt Wald, im Gegensatz zu Luftbildern. Dadurch lässt sich ein Teil der Feldarbeit und somit Kosten und Zeit einsparen. Ausserdem erhält man so einen Einblick in schwer zugängliche Gebiete, die zu Fuss nicht erreichbar wären.

Schwierigkeiten bei der Laserscaninterpretation gab es einerseits durch die hohe Belastung des Sehannes und andererseits durch die Artefakte in der Schräglingschattierung, die durch ungenügende oder zu starke Filterung zustande kamen.

6.3. Analyse

Leider konnten die Rutschungen nicht in Abriss- und Ablagerungsgebiet unterteilt werden, was eine sinnvolle Analyse bezüglich der Korrelation von Hangneigung und Rutschung verunmöglichte. Dazu wäre die Bestimmung der mittleren Hangneigung der Abrissnische nötig gewesen. Die Berechnung der mittleren Hangneigung über die ganze Rutschung inklusive Akkumulationsform ergäbe zu tiefe Werte, die nicht der für die Analyse massgebenden Neigung entsprächen.

Die Gesamtfläche und die prozentualen Anteile der Prozessbereiche konnten hingegen ohne Probleme berechnet werden. Wie erwartet, überwiegen die denudativen und fluvialen Prozesse.

Die Volumen- und Erosionsberechnungen sind ein Beispiel dafür, wie die digitalisierten Daten unmittelbar für eine Analyse genutzt werden können. Dabei wurde angenommen, dass das abgetragene Volumen der Auffüllung der Bachtobel bis an ihre Oberkante entspricht. Es ist anzunehmen, dass die Oberkanten auch schon erodiert wurden. Daher wurden tendenziell wohl zu kleine Volumen berechnet. Zum Teil mussten kleinere Bachtobel zu Einzugsgebieten zusammengefasst werden. Schwierigkeiten gab es bei der Abgrenzung der Einzugsgebiete und beim Festlegen der Oberkante.

Die Abtragungsraten der Bachtobel im Sihlwald variieren zum Teil beträchtlich (0.25 bis 1.66 mm/y). Durch Betrachten der Abbildung 5.7 kann man Vermutungen über die Ursachen für die Unterschiede anstellen. Es fällt auf, dass die Tobel mit geringeren Abtragungsraten zwischen Tobelbach und Wüesttobelbach im eher flachen Teil

des Sihlwaldes gelegen sind. Die grossen Erosionstrichter und eine präglaziale Entstehung könnten Erklärungen für die hohe Erosionstätigkeit im Tobel- (1.51 mm/y) bzw. Wüesttobelbach (1.66 mm/y) sein. Erstaunlich ist, dass Bäche im Sihlwald hinsichtlich der Erosionsleistung ähnlich grosse Werte wie Gebirgsbäche, wenn nicht sogar grössere Werte, aufweisen. Auch der Wehrenbach und Elefantenbach (1.88 mm/y) und das Sagentobel (1.23 mm/y) aus den Berechnungen von Jäckli (1989) weisen relativ hohe Abtragungsraten auf. Da aber nicht genau bekannt ist, wie die Werte von Haeberli et al. (2003) und Jäckli (1989) zustande kamen, ist der Vergleich kritisch und allgemeine Aussagen sind mit Vorsicht zu geniessen.

Sicher haben die Hangneigung, das Gestein und weitere Charakteristiken des Einzugsgebietes, sowie die klimatischen Verhältnisse einen Einfluss auf die Abtragungsraten. Ein mögliche Korrelation zwischen dem Pauschalgefälle und dem Abtrag wurde untersucht, aber es konnte mit der hier verwendeten Methode kein Zusammenhang festgestellt werden. Folgende Fragen drängen sich auf: Haben vielleicht andere Faktoren einen höheren Einfluss auf die Erosion, oder ist das Pauschalgefälle nicht der richtige Wert für die Hangneigung? Wo soll man bei einem verzweigten Einzugsgebiet die Länge messen? Wurde das Einzugsgebiet richtig kartiert? Existierten gewisse Bachtobel schon präglazial und andere erst seit ein paar hundert Jahren? Oder ist die grosse Variabilität der Natur der Grund für einen fehlenden Zusammenhang? Diese offenen Fragen können hier nicht zufriedenstellend beantwortet werden, zeigen aber die Richtung für weitere Analysen.

6.4. Fehlerbetrachtung

Es folgt die Diskussion zu den Elementen der Qualitätsdokumentation aus dem SDTS, der in Abschnitt 4.6 angedeutet wurde und die folgenden fünf Punkte beinhaltet:

- Positionsgenauigkeit
- Attributgenauigkeit
- Abstammung
- Logische Konsistenz
- Vollständigkeit

Die Positionsgenauigkeit bezieht sich auf die geometrische Genauigkeit der Objekte in der Karte. Je nach Eindeutigkeit und Erkennbarkeit der Grenzen lassen sich zwei verschiedene Typen unterscheiden:

1. Scharfe Grenzen: die Grenzen sind scharf definiert und auf der Schräglightschattierung gut erkennbar (z. B. Strassen, Gebäude, Weiher). Die Genauigkeit für diese Objekte beträgt ungefähr 1 Meter. Im Datenmodell mit 'Geometrie/Position sicher' gekennzeichnet.
2. Weiche Grenzen: die Grenzen sind unscharf und auf der Schräglightschattierung weniger gut erkennbar (z. B. Rutschungen, Schwemmfächer). Die Genauigkeit für diese Objekte beträgt etwa 5 Meter. Im Datenmodell mit 'Geometrie/Position unsicher' gekennzeichnet.

Die Abgrenzungsgenauigkeit muss nicht zwingend für das ganze Objekt dieselbe sein.

Mit der Attributgenauigkeit ist hier die Einteilung eines Objektes zur entsprechenden geomorphologischen Form gemeint. Je nach Erkennbarkeit in der Schräglightschattierung oder im Gelände sind die Formen mehr oder weniger gut deubar. Relativ junge Rutschungen beispielsweise sind viel einfacher zu erkennen als alte. Im Datenmodell wird dieser Sachverhalt mit 'Form/Prozess sicher' oder 'Form/Prozess unsicher' vermerkt.

Die Abstammung bezieht sich auf die Herkunft der Daten oder Quellen. Die Qualität und Aktualität ist von entscheidender Bedeutung. Das Laserscanmodell dürfte wohl, aufgrund der Aktualität und der hohen Auflösung, ohne Vorbehalte als gute Kartierbasis betrachtet werden. Gewisse Einschränkungen müssen gegenüber den amtlichen Karten und der Schweizerischen Landeskarte von Swisstopo, wegen des kleineren Massstabes (1: 25'000), der Generalisierung und anderen Abweichungen, gemacht werden.

Der nächste Punkt ist die logische Konsistenz. Dazu gehört, dass die Kartierung flächendeckend (keine Lücken) und nicht überlappend erfolgte. Die Lückenlosigkeit wird im Perimeter Sihlwald gewährleistet, jedoch nicht in seiner Umgebung. Überlappungen kommen hingegen auch ausserhalb nicht vor.

Die Vollständigkeit als letzter Punkt ist ein Mass für das Fehlen von Daten oder das Vorhandensein von zu vielen Daten. Das Fehlen von Daten kann darauf zurückzuführen sein, dass Formen in der Schräglightschattierung oder im Gelände nicht

6. Diskussion

erkannt und somit auch nicht kartiert wurden. Als Beispiel zu vieler Daten kann hier die Waldbahn genannt werden, da sie nur indirekt etwas mit der Geomorphologie zu tun hat.

Nach Demel und Hauenstein (2005) kommen verschiedene Messfehler als Gründe für die Ungenauigkeit der Position oder der Attributierung bei der Luftbildinterpretation in Frage:

- Feinheit der Digitalisierung: Strichdicke
- Abgrenzung: Detaillierungsgrad
- Interpretationsspielraum

Einen Einfluss auf die geomorphologische Karte hatten auch die Homogenität über die Zeit und die Homogenität der Quellen. Ermüdungserscheinungen, aber auch Lerneffekte des Interpreten führten während der Kartierung zu Heterogenitäten. Werden Informationen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen, gibt es immer uneinheitliche Resultate.

Um die Attributgenauigkeit und die Vollständigkeit zu steigern, wäre eine Geländeverifikation mit Experten sinnvoll. Der Rahmen dieser Arbeit sah aber aus Zeitgründen keine Geländeverifikation vor.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das letzte Kapitel geht auf die Ziele und Fragestellungen ein und zeigt Erreichtes und offene Fragen auf. In einem Ausblick wird auf das Potenzial des Laserscan-DGMs für die geomorphologische Kartierung eingegangen.

7.1. Schlussfolgerungen

Das Hauptziel dieser Arbeit war, einen geomorphologischen digitalen Datensatz des Sihlwaldes mit Hilfe eines Laserscan-DGM zu erstellen. Entstanden sind wertvolle Basisdaten, die nun auch für andere Banutzer zur Verfügung stehen. Daneben galt es, die drei Forschungsfragen zu beantworten.

Forschungsfrage 1: Welche geomorphologischen Formen und Prozesse treten im Sihlwald auf und welches sind die Hauptprozesse?

Die statistische Verteilung der Formen und Prozesse im Sihlwald konnte mittels deskriptiver Statistik aus dem digitalen Datensatz ermittelt werden. Das Vorkommen und die Häufigkeit der verschiedenen Prozesse durfte aufgrund des Klimas und der Geologie im Sihlwald so erwartet werden.

Forschungsfrage 2: Wie lassen sich geomorphologische Formen und Prozesse mit einem Laserscan-Geländemodell in einem dicht bewaldeten Gebiet identifizieren?

Die wichtigsten geomorphologischen Formen konnten identifiziert und flächendeckend für das gesamte Gebiet des Sihlwaldes kartiert werden. Somit hat sich das Laserscan vor allem für dicht bewaldete und schwer zugängliche Gebiete als Kartiergrundlage bewährt. Die hohe Auflösung des Laserscans führte zu einer hohen Lagegenauigkeit der kartierten Objekte. Die Vermessung mit dem GPS konnte wegen des Reliefschattens und des dichten Waldes nicht zufriedenstellend durchgeführt werden.

Forschungsfrage 3: Wie gross sind das abgetragene Volumen und die mittlere Erosion der Bachtobel seit dem Rückzug des Linthgletschers?

Die Berechnung der Bachtobelvolumen und der mittleren Erosionsleistung konnte mittels GIS-Funktionen effizient ermittelt werden. Die Resultate lassen sich mit ähnlichen Analysen vergleichen.

Eine geomorphologische Kartierung ist immer subjektiv. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass es keine klaren Definitionen zu den Formen gibt, weil die Natur so vielfältig ist, dass sie sich kaum in klare Grenzen zwingen lässt. Die Kartierung hängt aber auch stark von den Kenntnissen des Interpreten ab. Aus diesen Gründen hegt die Kartierung keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die relativ neue Methode der Interpretation eines Laserscan-DGMs steuerte einen grossen Beitrag zum Gelingen der geomorphologischen Kartierung bei. In dieser Hinsicht kann man den Einbezug eines Laserscan-DGMs als Fortschritt betrachten. Im Ganzen hat sich das Laserscanmodell sehr bewährt und ist für geomorphologische Kartierungen in bewaldeten Gebieten sehr zu empfehlen.

7.2. Ausblick

Aufgrund der Vorteile eines Laserscan-DGMs (siehe Abschnitt 6.2) und den gemachten Erfahrungen während dieser Arbeit versprechen die Laserscanner-Daten für geomorphologische Kartierungen ein hohes Potenzial.

Es hat sich gezeigt, dass geomorphologische Informationen manuell und visuell aus einem Laserscan-DGM extrahiert werden können. Dies ist jedoch mit hohem Arbeitsaufwand verbunden. Angenehm wäre es, wenn man die geomorphologischen Objekte automatisch kartieren und digitalisieren könnte. Einen Ansatz dazu liefert Schwander (2007), der mittels der Software eCognition die wichtigsten geomorphologischen Formen identifizieren und klassieren konnte.

Verbesserungen sind auch beim Datenmodell möglich. Zum Beispiel könnte man es so erweitern, dass pro Fläche mehrere sich überlagernde Prozesse aufgenommen und dargestellt werden könnten. Ausserdem wäre eine Überprüfung der Kartierung mittels einer Geländeverifikation mit Experten empfehlenswert.

Weitere Analysen wären bei den Rutschungen und den Abtragungsraten interessant. Um einen Zusammenhang zwischen Hangneigung und Rutschung zu bestätigen, müsste aber zuerst eine Einteilung in Abriss- und Ablagerungsgebiet vor-

genommen werden. Die fehlende Korrelation zwischen Hangneigung und Abtragsrate könnte mit einer anderen Methode überprüft werden.

Die gewonnen Basisdaten sind für die Forschung und die Besucher des Sihlwaldes interessant. Forscher können den digitalen Datensatz nutzen, um weitere Analysen durchzuführen oder um Veränderungen der Geomorphologie in Zukunft festzustellen. Da diese und weitere Daten aus dem GIS Sihlwald auch für die Besucher des Naturzentrums Sihlwald von Interesse sind, wäre es durchaus sinnvoll und erstrebenswert, die Daten in irgendeiner Form der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F. (1999): Airborne laser scanning-present status and future expectations. In: Photogrammetry and Remote Sensing, 54, S. 64–67.
- BALTSAVIAS, E., LOHR, U. UND WEHR, A. (1999): Theme Issue on Airborne Laser Scanning. In: Photogrammetry and Remote Sensing, 54, S. 61–63.
- BARSCH, D. UND MÄUSBACHER, R. (1980): Auszugs- und Auswertungskarten als mögliche nutzungsorientierte Interpretation der Geomorphologischen Karte 1:25'000. In: Berliner Geographische Abhandlungen, 31, S. 31–48.
- BAUMHAUER, R. (2006): Geomorphologie. Geowissen kompakt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt, 144 S, S. 144.
- BEER, A. (2005): GIS-basierte geomorphologische Kartierung in der Val Chamuera sowie morphochronologische Untersuchungen am Schwemm-/Murkegel der Val Champagna im Oberengadin (GR). Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 97 S.
- BOLLIGER, T. (1999): Geologie des Kantons Zürich. Ott Verlag, 163 S, S. 163.
- BRÄNDLI, M. (1997): Modelle und Algorithmen für die Extraktion geomorphologischer und hydrologischer Objekte aus digitalen Geländemodellen. Dissertation, Philosophische Fakultät der Universität Zürich, 176 S.
- BURROUGH, P. A. UND MCDONNELL, R. A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 333 S.
- DEMEL, W. UND HAUENSTEIN, P. (2005): HABITALP. Habitatkartierung mit Farbinfrarot-Luftbildern. Anleitung zur Abgrenzung und Interpretation. Forschungsprojekt im Rahmen des Interreg III B Alpenraumprogramms. URL <http://www.habitalp.org> (Zugriff: Mai 2008).
- DIKAU, R. (1990): Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 80, S. 45–55.
- DIKAU, R. (1993): Geographical Information Systems as Tools in Geomorphology. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 92, S. 231–239.

- DUCIC, V., HOLLAUS, M., ULLRICH, A., WAGNER, W. UND MELZER, T. (2006): 3D vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning. In: Workshop on 3D remote sensing in forestry, 8a, S. 211–217.
- EMBLETON, C. UND LIEDTKE, H. (1990): Geomorphological mapping, remote sensing and terrain models. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 80, S. 1–5.
- FRENCH, J. R. (2003): Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling. In: Earth Surface Processes and Landforms, 28, S. 321–335.
- GARDNER, T. W., SASOWSKY, K. C. UND DAY, R. L. (1990): Automated extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 80, S. 57–68.
- GITTA (2008): Geographic Information Technology Training Alliance. Basic GIS Analysis. URL <http://www.gitta.info> (Zugriff: Juni 2008).
- GROSSMANN, H., KREBS, E., RITZLER, K. UND WEISZ, L. (1938): Holzversorgung und Forstverwaltung im 19. und 20. Jahrhundert. Stadtforstamt Zürich, 153 S.
- HAEBERLI, W., HOLZHAUSER, H. UND MAISCH, M. (2003): Grundzüge der Geomorphologie. Vorlesungsunterlagen - Sommersemester 2003. Universität Zürich.
- HAEBERLI, W., KELLER, F., KRÜSI, B., EGLI, M., ROTHENBÜHLER, C., MEILWES, J. UND GRUBER, S., Hg. (2007): GISALP - Raum-zeitliche Informationen über schnelle Klimaänderungen in hochalpinen Umweltsystemen als strategisches Werkzeug. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 213 S.
- HAECKY, R. (2007): Zürich gönnt sich einen Urwald. Zürichsee Zeitungen. 4.12.2007. Adliswil.
- HANSA LUFTBILD (2007): Airborne Laser Scanning. URL <http://www.hansaluftbild.de> (Zugriff: Januar 2008).
- HANTKE, R. UND MITARBEITER (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. In: Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 2, S. 91–122.
- IMBAUMGARTEN, T. (2005): Kartierung und GIS-basierte Darstellung der Geomorphologie im Gebiet Val Bever/Val Saluver (GR) sowie Modellierung spät- und postglazialer Gletscherstände in der Val Muragl (GR). Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 139 S.

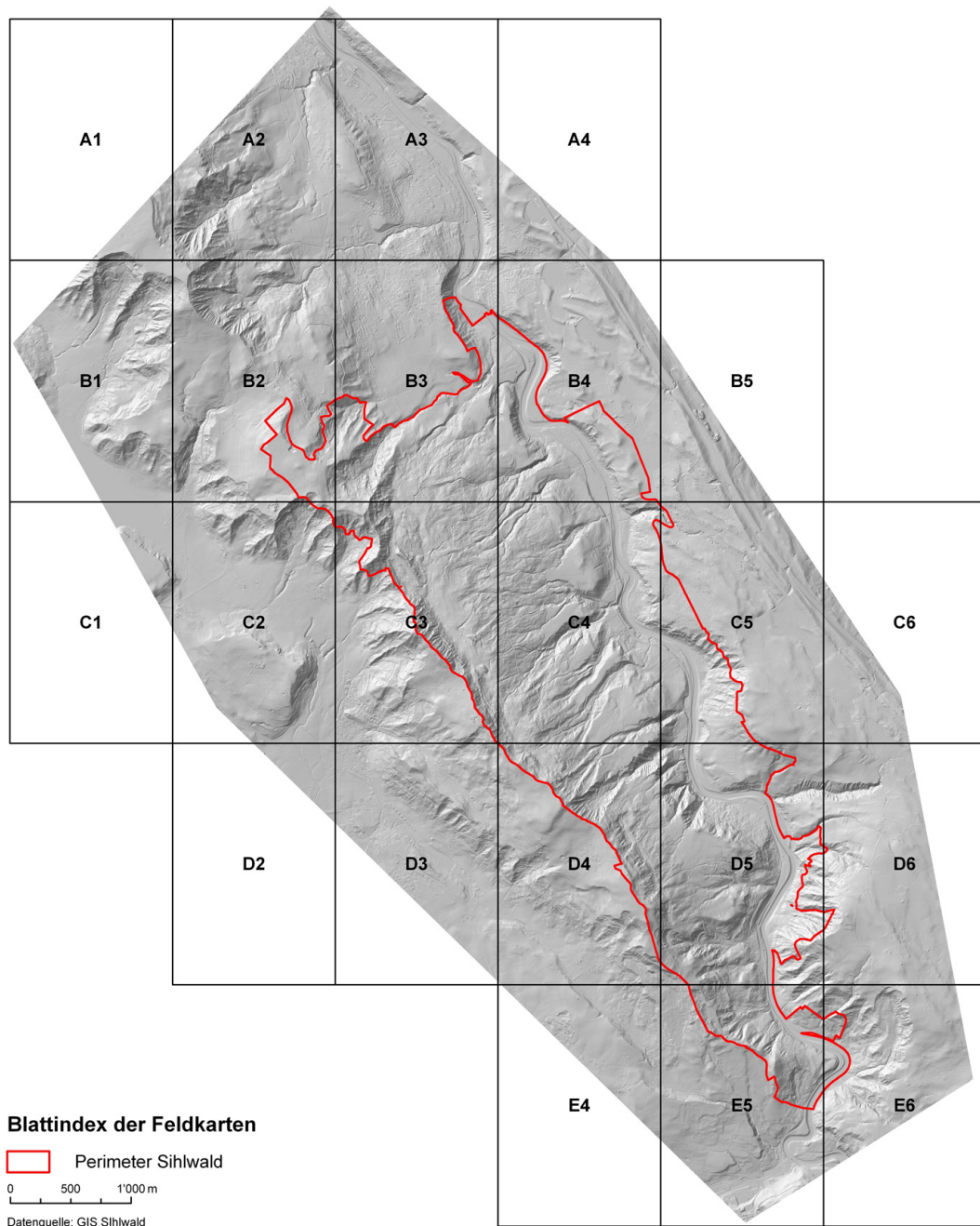
- ITTEN, K. I. (2003): Übungen Fernerkundung I, Landnutzungskartierung. Vorlesungsunterlagen - Wintersemester 2003/2004. Universität Zürich.
- JÄCKLI, H. (1989): Geologie von Zürich. Orell Füssli, 215 S.
- JONES, A. F., BREWER, P. A., JOHNSTONE, E. UND MACKLIN, M. G. (2007): High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, S. 1574–1592.
- KAPPEL, G. UND SCHREFL, M. (1996): Objektorientierte Informationssysteme. Springer Verlag, 321 S.
- KELLER, K. UND KRAYSS, E. (2005): Der Rhein-Linth-Gletscher im letzten Hochglazial. In: *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 150 (1-2), S. 19–32.
- KIENHOLZ, H. (1980): Beurteilung und Kartierung von Naturgefahren. Mögliche Beiträge der Geomorphologie und der Geomorphologischen Karte 1: 25'000 (GMK 25). In: *Berliner Geographische Abhandlungen*, 31, S. 83–90.
- KIENHOLZ, H. (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. BUWAL, 66 S.
- KIENHOLZ, H. UND HAEBERLI, W. (1992): Geographische Informationssysteme in der Geomorphologie. Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG), 21. Juni 1991. Arbeitsgemeinschaft Geographica Bernensia in Zusammenarbeit mit der Geographischen Gesellschaft von Bern, 74 S.
- KOCH, R. (2003): Geomorphologische Kartierung im Berninagebiet sowie GIS-basierte Darstellung und Analyse der Geomorphologie im Gebiet Oberengadin (GR). Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 97 S.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN WESTFALEN (2007): Erfassungsverfahren: Laserscanning. URL <http://www.lverma.nrw.de> (Zugriff: Januar 2008).
- LANE, S. N. UND CHANDLER, J. H. (2003): The generation of high quality topographic data for hydrology and geomorphology: new data sources, new applications and new problems. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, S. 229–230.
- LESER, H., Hg. (2001): Diercke Wörterbuch. Allgemeine Geographie. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, 1037 S.
- LESER, H. (2003): Geomorphologie. Westermann, 424 S.

- LESER, H. UND STÄBLEIN, G. (1975): Geomorphologische Kartierung. Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten 1: 25'000. Institut für Physische Geographie der Freien Universität Berlin, 39 S.
- McKEAN, J. UND ROERING, J. (2004): Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. In: *Geomorphology*, 57, S. 331–351.
- METEOSCHWEIZ (2007): Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. URL <http://www.meteoschweiz.admin.ch> (Zugriff: Januar 2008).
- OSTERWALDER, W. (2008): Hochwasserschutz bei Seitenbächen der Sihl. In: *Vereinigung pro Sihltal*, 58, S. 10–11.
- PETZOLD, B., REISS, P. UND STÖSSEL, W. (1999): Laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. In: *Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, S. 95–104.
- PFEIFER, N. (2003): Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Unterlage des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- ROTH, I. (2008): Sihlwald und Wildpark Langenberg. Stiftung Naturlandschaft Sihlwald.
- ROTHENBÜHLER, C. (2000): Erfassung und Darstellung der Geomorphologie im Gebiet Bernina (GR) mit Hilfe von GIS. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 94 S.
- ROTHENBÜHLER, C. (2006): GISALP - Räumlich-zeitliche Modellierung der klimasensitiven Hochgebirgslandschaft des Oberengadins. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich. *Physische Geographie*, Vol. 50, 179 S.
- SCHMIDER, P., KÜPER, M., TSCHANDER, B. UND KÄSER, B. (1994): Die Waldstandorte im Kanton Zürich. *Waldgesellschaften, Waldbau, Naturkunde*. Oberforstamt und Amt für Raumplanung des Kantons Zürich, 287 S.
- SCHMIDT, R. (2006): Schutzgebiets-GIS: Wie der Sihlwald in den Computer kam. Tagungsband zur Umwelt06, Modul "GIS und Umwelt: Effiziente Umweltplanung mit Geoinformation", Zürich, 9 S.
- SCHNEIDER, B. (2001): Sihlwald Natur- oder Nutzwald? In: *Vereinigung pro Sihltal*, 51, S. 20–25.

- SCHWANDER, A. (2007): Geomorphologische Kartierung im alpinen Raum mit IKONOS Satellitendaten. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 60 S.
- SHI, W., FISHER, P. F. UND GOODCHILD, M. F., Hg. (2002): Spatial Data Quality. Taylor & Francis, 313 S.
- SIHLWALD DATA CENTER (2007): Sinn und Zweck des Informationssystems Sihlwald. URL <http://www.sihlwald.unizh.ch> (Zugriff: Januar 2008).
- STÄBLEIN, G. (1980): Die Konzeption der Geomorphologischen Karten GMK25 und GMK100 im DFG-Schwerpunktprogramm. In: Berliner Geographische Abhandlungen, 31, S. 13–30.
- STRAUMANN, R. (2005): Sensitivität von Prozessmodellen in Bezug auf die Auflösung LIDAR-basierter Höhendaten. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, 130 S.
- SUTER, H. (1956): Geologie des Sihltals. In: Blätter der Vereinigung pro Sihltal, 6, S. 1–28.
- TOPOSYS (2004): Protokoll der Auswertung Sihlwald, CH.
- VAN DEN EECKHAUT, M., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., VANACKER, V., MOEYERSONS, J., NYSEN, J. UND VAN BEEK, L. P. H. (2005): The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides. In: Geomorphology, 67, S. 351–363.
- VAN DEN EECKHAUT, M., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., VANACKER, V., NYSEN, J., MOEYERSONS, J., VAN BEEK, L. P. H. UND VANDEKERCKHOVE, L. (2006): Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. In: Earth Surface Processes and Landforms, 32, S. 754–769.
- WAGNER, W., ULLRICH, A. UND BRIESE, C. (2004): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 4, S. 223–235.
- ZEILER, M. (1999): Modeling our World, the ESRI guide to geodatabase design. ESRI Press, 199 S.

A. Anhang

A.1. Feldkarte



A.2. Gliederung des Formencodes

1000er Stelle	100er Stelle	1er Stelle	Beschreibung
1000			Gewässer
	1100		Fliessgewässer
		1101	Fluss
		1102	Wasserfall
	1200		Stehende Gewässer
		1201	Weiher
2000			Geomorphologie
	2100		Fluvialer Prozessbereich
		2101	Fluviale Erosion
		2102	Erosionsrinne
		2103	Schwemmfächer
		2104	Erosionstrichter
		2105	Alluvialfläche
		2106	Terrassenkante
	2200		Denudativer Prozessbereich
		2201	Denudative Fläche
		2202	Hangkriechen
		2203	Hangkriechfront
		2204	Rutschung/Sackung
	2300		Glazialer Prozessbereich
		2301	Findling
		2302	Moräne
		2303	Moränenkamm
		2304	Rundhöcker
	2400		Gravitativer Prozessbereich
		2401	Gravitative Fläche
		2402	Bergsturzblick
	2500		Organo-biogener Prozessbereich
		2501	Ried
	2600		Reliefformen
		2601	Aufschluss

A. Anhang

		2602	Geländerippe
		2603	Erosionskante
		2604	Mulde
3000			Anthropogener Prozessbereich
	3100		Versiegelte Fläche
	3200		Anderes
		3201	Kiesgrube
		3202	Waldbahn
4000			Andere Formen
...			...
-9999			keine Angaben
-9998			nicht definierbar

A.3. Attributtabelle

Die Spalten 1-10 sind bei Punkt-, Linien- und Flächenobjekten zu finden. Die Shape_Length existiert nicht bei punktförmigen und die Shape_Area nur bei flächenförmigen Objekten. Die Linien haben zusätzlich zwei Spalten mit Regeln der Representation.

Spalte	Beschreibung
OBJECTID	Automatisch generierte Nummer von ArcGIS
Shape	Geometrie des Objekts: Punkt, Linie oder Polygon
Name	Bezeichnung der Form
Prozessbereich	Code des Prozessbereiches
Substrat	Oberflächenmaterial
Datenqualität	Code für die Datenqualität
Quelle	Kürzel der Quellenangaben
Datum	Datum der Quelle
Formencode	Code des Form- oder Prozesstyps
UID	Universal Identification Number
Shape_Length	Linie: Länge des Objekts, Polygon: Umfang des Objekts
Shape_Area	Fläche des Objektes (nur bei Polygonen)
RuleID	Representation Regel, die das Objekt symbolisiert
Override	Override über eine Representation Regel

A.4. Legendenkonzept

Punktförmige Objekte:

Form	Symbol	Farbe	Grösse
Bergsturzblock	Kreis	Flame Red	3 pt
Findling	Dreieck	Aster Purple	8 pt
Mulde	Kreis mit Punkt	Black	6 pt
Wasserfall	Wassertropfen	Moorea Blue	8 pt

Linienförmige Objekte: (alles mit Representation, ausser Bach und Umriss.trichter)

Form	Linie	Farbe	Grösse	Marker
Aufschluss	Line with round caps	Medium Coral Light	0.4 pt	2x offset (-0.8, 0.8)
Bach	Line	10.147.252	1 pt	
Erosionskante	Line with round caps	Cherry Cola	1.2 pt	Offset 1.3, size 4, angle 90, step 5, endings with marker
Erosionsrinne	Line with round caps	Leaf Green	1.7 pt	
Hangkriechfront	Line with round caps	Cordovan Brown	1.5 pt	
Moränenkamm	Dashed Line 3:3	Cabernet	1.5 pt	Endings with full pattern, round caps
Terrassenkante	Line with round caps	Gray 80%	1 pt	Offset 1.5, size 3, step 7, endings with half gap
Umriss.trichter	Hash-Line	Gray 80%	4 pt	Offset -2.7, angle 90, width 1.5, interval 4.5
Waldbahn	Dashed Line 4:4	Gray 60%	1 pt	

Flächenförmige Objekte: (Transparenz generell 25%)

Form	Farbe	Outline Width	Outline Colour	Marker
Alluvialfläche	Lotus Pond Green	0.4 pt	Gray 80%	
Denudative Fläche	Medium Sand	0.4 pt	Gray 80%	
Erosionstrichter	Fern Green	1 pt	Gray 80%	
Fluss	Yogo Blue	0.4 pt	Cretean Blue	
Fluviale Erosion	Medium Key Lime	0.4 pt	Gray 80%	
Geländerippe	Rose Quartz	0.4 pt	Gray 80%	
Gravitative Fläche	130.74.46	0.4 pt	Gray 80%	
Hangkriechen	Medium Sand	0.4 pt	Gray 80%	ESRI Sand
Kiesgrube	Gray 50%	0.4 pt	Gray 80%	Circle, Size 4, Seperation 6
Moräne	Aster Purple	0.4 pt	Gray 80%	
Ried	Quaternary 1	0.4 pt	Gray 80%	Geology 24K, sandy or silty shale, Black
Rundhöcker	Ultramarine	0.4 pt	Gray 80%	
Rutschung / Sackung	Raw Umber	0.4 pt	Gray 80%	
Schwemmfächer	Fern Green	0.4 pt	Gray 80%	ESRI, Snowfield/Ice
Versiegelte Fläche	Gray 50%	0.4 pt	Gray 80%	
Weiher	Lake (151.219.242)	0.4 pt	18.15.255	