



# **Überwachung von Massenbewegungen mittels terrestrischem Laserscanning in der Naturgefahrenforschung**

Diplomarbeit

verfasst und vorgelegt von:

**Florian Singer**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom Ingenieur**

angefertigt am

Institut für Alpine Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien

Betreuer

Univ. Prof. DI Dr. nat. techn. Johannes Hübl

DI Dr. Alexander Prokop

Wien, am 01. April, 2015



Ich erkläre hiermit eidesstattlich, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angeführten Literatur und Methoden verfasst zu haben.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken wurden als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort und Datum: .....

Unterschrift:.....



# Danksagung

Ich möchte in erster Linie Dr. Alexander Prokop danken, der mir die gesamte Zeit, die ich brauchte, um diese Diplomarbeit fertig zu machen, sehr geduldig mit Rat und Tat zur Seite stand und sehr schnell mehr Freund als Betreuer wurde.

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Johannes Hübl für die Prüfung und abschließende Beurteilung der Diplomarbeit.

Weiters verdanke ich diese Diplomarbeit DI Nikolaus Studnicka. Dank seiner Tätigkeit bei der Firma Riegl Laser Measurement Systems und deren großzügiger Kooperationsbereitschaft war es mir möglich, immer wieder auf Geräte, die für die Datenerhebung unverzichtbar waren, zurück zu greifen. Hier soll auch erwähnt werden, dass eine so selbstverständliche Unterstützung seitens einer Firma nicht alltäglich ist.

Dank gilt vor allem auch Dr. Lena Winkler. Ihre Unterstützung in bürokratischen und organisatorischen Dingen erleichterte mir vieles.

Meinen Eltern Mag. Michaela und DI Fritz Singer möchte ich ganz besonders danken, dass sie über so lange Zeit hinweg immer daran glaubten, dass ich mein Studium erfolgreich abschließen werde, mir so viele Dinge neben dem Studium ermöglichten und mich in allen Nebenausbildungen und Aktivitäten so sehr unterstützten.

## Abstract – Deutsch

In dieser Arbeit wird anhand zweier Projekte veranschaulicht, wie sich terrestrisches Laserscanning für die Überwachung von Massenbewegungen in der Naturgefahrenforschung eignet. Um einen möglichst breit gefächerten Überblick über die Möglichkeiten für die Verwendung des Laserscanners zur Messung von Massenbewegungen in diesem Forschungsgebiet zu geben, wurden zwei verschiedene Projekte ausgewählt.

Bei dem Projekt am Col du Lautaret Testgelände in den französischen Alpen wurde getestet, inwieweit es möglich ist, in adäquater Zeit die zur dynamischen Lawinenmodellierung nötigen Daten genau und plausibel aufzunehmen.

In diesem Projekt wurden Messwerte eines terrestrischen Laserscans einer künstlich ausgelösten Lawine aufgenommen und Ergebnisse zu Plausibilitätsprüfung der dynamischen Lawinenmodellierung dargestellt. Zwei terrestrische Laserscans, einer vor und einer nach der Lawinenauslösung, lieferten die Schneeoberflächeninformationen, welche für die Analyse benötigt wurden. Die Scans waren über vermessene Kontrollpunkte und Multi Station Adjustment exakt referenziert und die daraus gewonnenen Daten wurden in GIS ausgewertet. Ergänzende Messungen mit einer Totalstation boten Vergleichsdaten und damit eine Gütekontrolle der TLS – Daten. Die Resultate zeigten, dass terrestrisches Laserscanning in der Lage ist, effizient exakte Lawinenmodellierungsdaten zu liefern. (Prokop, et al., 2014)

Das zweite Projekt entstand im Rahmen des EU-LIFE-Projekts „Obere Drau“ bei dem mittels Laserscanner Geschiebeumlagerungen nach der Errichtung einer neuen Geschiebesperre in Schlitzbauweise zu mehreren Messzeitpunkten aufgenommen wurden. Anhand mehrerer Messungen des Unterlaufes ab der neuen Schlitzsperre im Zeitraum von 2008 bis 2011 konnte festgestellt werden, wie viel Geschiebe oberhalb der neuen Sperre erodiert wurde, wie viel davon am Schwemmkegel bei der Mündung in die Drau abgelagert wurde und wie viele Kubikmeter schlussendlich in die Drau transportiert wurden. Daraus geht hervor, dass sich terrestrisches Laserscanning auch hervorragend zur Messung von Geschiebebilanzen in Gebirgsbächen nutzen lässt. (Prokop, et al., 2011)

## Abstract – English

This paper, which is based on two projects, illustrates whether or not terrestrial laser scanning is useful for the monitoring of mass movements in the field of Natural Hazards Research. Two different projects were selected to show how broad the range of possibilities is for the use of the laser scanner in measuring mass movements in this field of research.

In dynamic avalanche modeling, data about the volumes and areas of the snow released, mobilized and deposited are key input parameters, as well as the fracture height. Such calculations require high-resolution spatial snow surface data from before and after the avalanche. In snow and avalanche research, terrestrial laser scanners are increasingly used to accurately map snow depths over an area of several square kilometers. We present data from a terrestrial laser scan campaign of an artificially triggered avalanche at the Col du Lautaret test site in the French Alps and provide data for the validation of dynamic avalanche models. Two terrestrial laser scans from before and after the avalanche release provided the snow surface data required for our analysis. The scans were accurately referenced with surveyed control points and multi-station adjustment, and the resulting data was analyzed in Geographic Information System (GIS). Additional measurements from a total station and of snow densities provided the data for comparison and validation of the Terrestrial Laser Scanner (TLS) data. Our results show the ability of TLS to determine avalanche modeling input parameters efficiently and accurately. (Prokop, et al., 2014)

The second part of this work arose under the EU-LIFE-project "Obere Drau" where, after the establishment of a new bedload-blocker in slot design, erosion and deposition of bedload were measured by using a terrestrial laser scanner. Based on several measurements taken of the lower course of the brook between 2008 and 2011 we were able to determine how much sediment has been eroded above the new blocker, how much was deposited at the alluvial fan at the entry to the river Drau and how many cubic meters finally were transported in the Drau. The success with the project „Obere Drau“ shows that terrestrial laser scanning can be used also for measuring the sediment balance in mountain streams. (Prokop, et al., 2011)

## Inhalt

1. Einleitung .....	1
1.1. Grundlegendes zu terrestrischem Laserscanning .....	2
1.2. Distanzmessung nach dem Laufzeitprinzip .....	2
1.2.1. Reflexionsmöglichkeiten des Laserstrahls .....	5
1.3. Vergleich des Laserscans mit anderen Aufnahmemethoden .....	8
1.4. Terrestrisches, mobiles und Airborne Laserscanning .....	10
1.4.1. Terrestrisches Laserscanning .....	12
1.4.2. Mobile Laserscanning .....	14
1.4.3. Airborne Laserscanning .....	15
2. Zielsetzung .....	16
3. Methodik .....	18
3.1. Verwendete Laserscanner .....	18
3.1.1. LMS – Z420i .....	18
3.1.2. LPM – 321 .....	20
3.1.3. Reflektoren .....	24
3.2. Laserscanning und Datenverarbeitung am Col du Lautaret .....	25
3.3. Laserscanning und Datenverarbeitung am Feistritzbach .....	27
3.3.1. Messgenauigkeit .....	31
4. Untersuchungsgebiet .....	31
4.1. Col du Lautaret .....	31
4.2. Feistritzbach .....	33
5. Ergebnisse und Diskussion .....	35
5.1. Ergebnisse des Projekts vom Col du Lautaret .....	35

5.2.	Diskussion des Projekts vom Col du Lautaret.....	44
5.3.	Ergebnisse des Projekts am Feistritzbach.....	45
5.3.1.	Scanabschnitt 1.....	45
5.3.2.	Scanabschnitt 2.....	53
5.3.3.	Scanabschnitt 3.....	56
5.3.4.	Scanabschnitt 4.....	58
5.3.5.	Scanabschnitt 5.....	60
5.3.6.	Scanabschnitt 6.....	62
5.4.	Diskussion des Projekts am Feistritzbach.....	64
6.	Zusammenfassung.....	66
7.	Literaturverzeichnis.....	69
8.	Abbildungsverzeichnis.....	72
9.	Tabellenverzeichnis.....	76
10.	Formelverzeichnis.....	77
11.	Appendix.....	78



## 1. Einleitung

Sturzfluten, Murgänge und Lawinen stellen eine ernst zu nehmende Bedrohung in alpinen Regionen dar. Vor allem der Sediment- und Geschiebetransport ist hauptverantwortlich für die meisten durch Wildbäche verursachten Zerstörungen.

Das in Wildbächen mitgeführte Material variiert stark von tonmineralischen Partikeln bis hin zu Felsen mit einem Durchmesser von mehreren Metern. Genauso komplex kann ein Schüttkegel einer Lawine zusammengesetzt sein: von kleineren, lockeren Schneemassen bis hin zu mit mitgerissenen Bäumen, Sträuchern und Felsen durchsetzten, kompakten Nassschneemassen.

Für Geowissenschaftler/innen ist es wichtig, mögliche Auslösezonen, Ablagerungsflächen und deren Auslauflängen vorherzusagen. Die Analyse dieser Flächen ist eine sehr wichtige Komponente beim Einschätzen von alpinen Einzugsgebieten, welche auch die Vorhersage von potentiellen Gefahrenzonen und das Kartieren der Verteilung der Gefahrenintensitätsparameter, wie zum Beispiel Ablagerungsmächtigkeit von Geschiebe nach einem Hochwasser, einem Murgang oder einer Lawine beinhalten. (Prokop, A., 2007)

## 1.1. Grundlegendes zu terrestrischem Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist ein polares Verfahren, bei dem Richtungen und Distanzen gemessen werden. In den folgenden Punkten soll ein Grundverständnis dafür vermittelt werden.

## 1.2. Distanzmessung nach dem Laufzeitprinzip

Bei der elektronischen Distanzmessung greift man im Allgemeinen auf das Prinzip der Laufzeitmessung mit Laserimpulsen im nahen Infrarotbereich, das sind Wellenlängen von 780 nm bis 1500 nm, zurück. Wegen der Bündelungsfähigkeit, welche direkt proportional zur Frequenz ist, eignet sich dieser Frequenzbereich neben Mikrowellen (1 mm – 1 m) am besten für derartige Anwendungen. Während kürzere Wellen, wie beispielsweise ultraviolette Strahlung im Bereich von 1 nm – 360 nm, von der Atmosphäre zu stark absorbiert werden und eine sehr geringe Reichweite die Folge wäre, sind langwelligere Signale nur sehr schlecht bündelbar und daher auch nicht für den Einsatz geeignet. In Abbildung 1 ist das vereinfachte Prinzip des Impulsverfahrens dargestellt. (Redl, 2005)

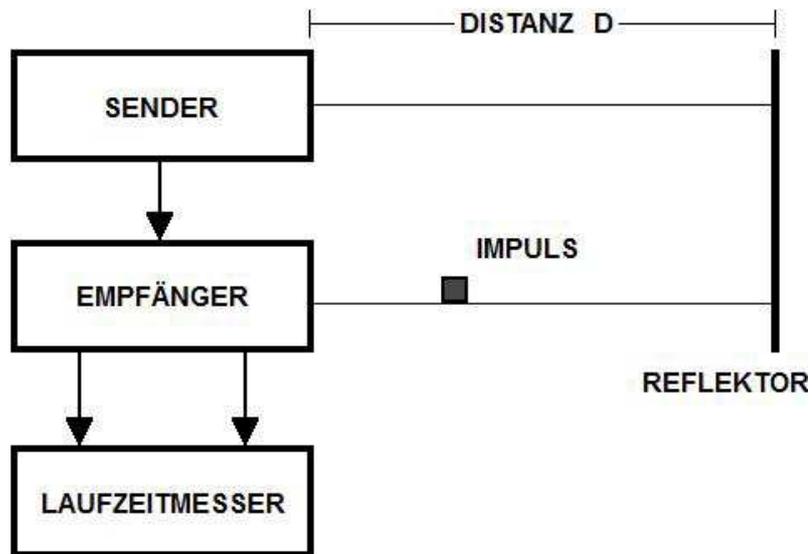


Abbildung 1: Laufzeitprinzip (Redl, 2005)

Bei der elektronischen Distanzmessung sendet ein Halbleiterdiodenlaser, welcher in periodischer Folge durch einen elektrischen Impulsgenerator angesteuert wird, kurze Lichtimpulse im Infrarotbereich aus. Diese Lichtimpulse, durch die Sendeoptik gebündelt, werden als Signal abgeschickt. Dieses Signal wird an der Zieloberfläche, wie zum Beispiel Vegetation, Fassaden von Gebäuden, teilweise reflektiert und kann dadurch in der Empfangsoptik mittels Photodiode gemessen werden.

Die auf diese Art und Weise gewonnene Information wird zur quarzstabilisierten Takt- bzw. Zeiteinheit weitergeleitet. Über den Zeitunterschied zwischen Aussendung und Empfang des Signals kann nun die Laufzeit berechnet werden.

In der Formel (1) ist der Zusammenhang zwischen Laufzeit  $t_L$  und Entfernung  $R$  erkennbar. (Kneubühl, et al., 1999)

$$t_L = 2 \frac{R}{c} \quad (1)$$

Die Variable  $c$  ist die Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtimpulses und kann mit 300.000 km/s angenommen werden.

Die direkte Entfernungsmessung basiert im Grunde auf der Eigenschaft von kurzwelliger, elektromagnetischer Strahlung, sich in einem homogenen Medium

geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit auszubreiten und an Grenzen verschiedener Medien reflektiert zu werden.

Theoretisch wird in einem homogenen Medium die messbare Maximaldistanz nur durch die Pulsrate und die Kapazität der Taktmesseinheit begrenzt, da kein weiterer Impuls ausgesandt werden darf, solange das vorhergehende Echo nicht empfangen wurde. Die Praxis zeigt aber, dass Faktoren wie Reflexionsverhalten der Objekte, Luftverschmutzung, Übertragungsverluste und Laserenergie die Leistung eines Laserscanners beeinflussen.

Der wichtigste Bestandteil des Halbleiterlasers ist ein kleiner Quader mit Abmessungen  $300\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  aus einem Halbleitermaterial, der in der Mitte durch einen  $1\ \mu\text{m}$  breiten Spalt geteilt ist. In diesem Spalt findet der eigentliche Lichtgenerierungsprozess statt. Durch einen teils reflektierenden, teils durchlässigen Spiegel verlässt der Lichtimpuls den Laser, um durch eine Kollimationslinse wieder in parallele Strahlen umgewandelt zu werden. (Panholzer, 2009) (Redl, 2005)

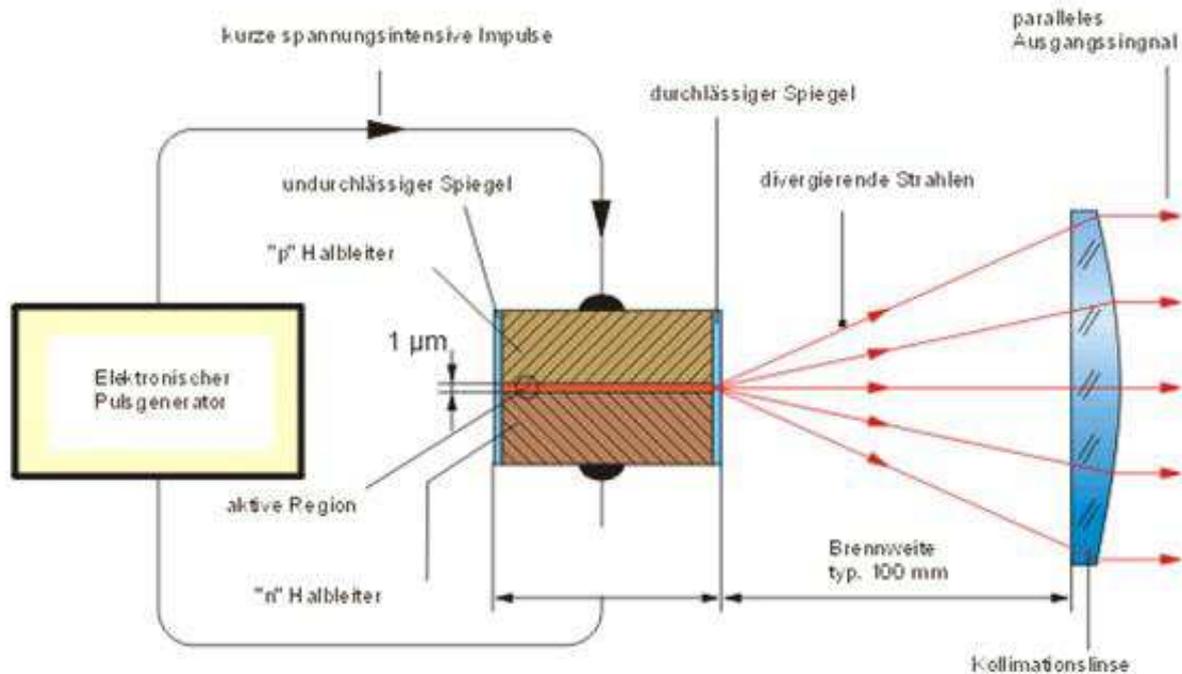


Abbildung 2: Laserprinzip (Redl, 2005)

Die Vor- und Nachteile des Impulsverfahrens sind:

- + Hoch aufgelöste, eindeutige Streckenmessergebnisse sind in kurzer Zeit verfügbar.
- + Im Vergleich zum Phasenmessverfahren können durch die extrem kurzen, energiereichen Impulse größere Reichweiten bei gleicher Leistung erzielt werden.
- + Es treten, im Gegensatz zum Phasenmessverfahren, keine systematischen Fehler auf.
- Durch die Lasersicherheitsbestimmungen, welche durch die Klassifizierung der Laser geregelt werden, wird die Impulsenergie begrenzt.
- Es ist ein hoher technischer Aufwand nötig, um höchste Genauigkeitsansprüche zu erfüllen (zum Beispiel bei der Erfassung von atmosphärischen Einflüssen). (Redl, 2005)

Vollständigkeitshalber muss noch das Phasenvergleichsverfahren, bei dem die Phasendifferenz zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal ermittelt wird, und das Triangulationsverfahren zur Distanzermittlung, erwähnt werden. Da aber im Zuge dieser Diplomarbeit kein Gerät genutzt wurde, welches mit einem der beiden Verfahren arbeitet, wird nicht näher auf diese Messmethoden eingegangen. (Redl, 2005)

### **1.2.1. Reflexionsmöglichkeiten des Laserstrahls**

In erster Linie sind es die Art des Materials und die Rauheit der Oberfläche, die eine wesentliche Rolle für die Reflexionseigenschaften spielen. Daneben hat darauf auch die Wellenlänge der Laserstrahlen Einfluss. Aus diesen Faktoren ergeben sich verschiedene Arten der Reflexion, die für die Interpretation der gewonnenen Daten unverzichtbar sind. (Redl, 2005)

- **Diffuse Reflexion** entsteht beim Auftreffen des Lichtstrahls auf Microfacetten der Oberfläche und wird dort in nahezu alle Richtungen reflektiert. (Redl, 2005)

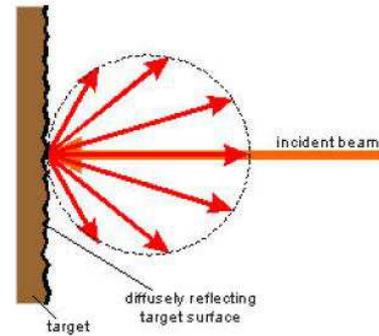


Abbildung 3: Diffuse Reflexion (Redl, 2005)

- **Spiegelreflexion** tritt dann auf, wenn der Lichtstrahl fast zur Gänze nach den Gesetzen von Snell reflektiert wird (Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel). In diesem Fall erhält man kein Echo, welches gemessen werden kann (zum Beispiel bei einer Wasseroberfläche). (Redl, 2005)

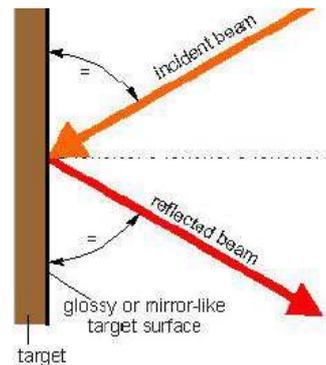


Abbildung 4: Spiegelreflexion (Redl, 2005)

- **Retroreflexion** ist dann gegeben, wenn der Laserstrahl in (theoretisch) exakt der entgegengesetzten Richtung reflektiert wird. Der auftreffende Strahl wird nahezu parallel reflektiert. (Redl, 2005)

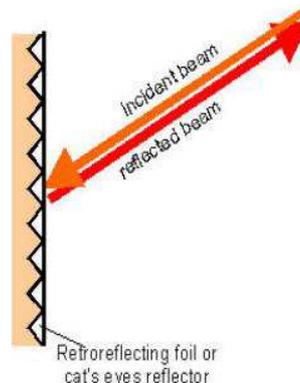


Abbildung 5: Retroreflexion (Redl, 2005)

Der Reflexionskoeffizient  $\rho$  gibt das Reflexionsverhalten unterschiedlicher Materialien an und entspricht dem reflektierenden Anteil des Lichtstrahls, welcher an der Objektoberfläche auftrifft. Dabei kann eine diffus reflektierende Oberfläche maximal 100% Reflexion aufweisen. Spiegel- und Retroreflexion hingegen ermöglichen Koeffizienten von viel mehr als 100% (Reflektorfolie 3M2000X

beispielsweise bei einer Wellenlänge von 900 nm erreicht einen Koeffizient von 1250%).

Vor allem beim Scannen auf Schneeoberflächen muss man besonders darauf achten, mit welcher Wellenlänge der Scanner arbeitet, den man benützen möchte. Für die Wahl eines optimalen Laserscanners und dessen Wellenlänge müssen die optischen Eigenschaften, vor allem das Reflexionsvermögen, von Schnee berücksichtigt werden. Da der Schnee mit einer Laserwellenlänge von 1500 nm sehr schlechte Reflexionswerte liefert, werden terrestrische Laserscansysteme, welche mit 900 nm Wellenlänge arbeiten, bevorzugt verwendet. Die Geräte LPM – i800HA, LPM – 2K und LPM – 321 arbeiten mit dieser Wellenlänge. Die Grafik unten zeigt, dass die Reflexion eines Laserstrahls mit 900 nm Wellenlänge für jede Schneekorngröße sehr gute Werte liefert.

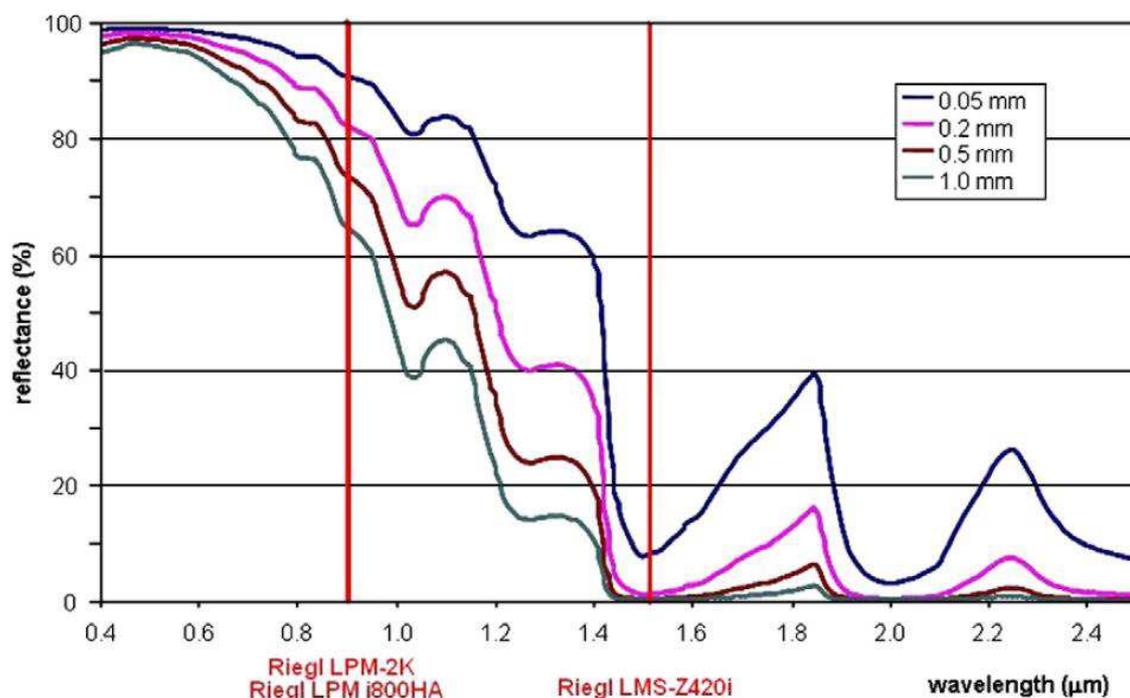


Abbildung 6: Reflexionsvermögen von Schnee in Abhängigkeit der Korngröße (Warren, 1982; Painter & Dozier 2003) in (Prokop, 2008)

Die Wellenlänge von 1500 nm, welche bei dem LMS – Z420i verwendet wird, ist sehr limitierend in Bezug auf die Messmöglichkeiten von Schneeoberflächen. (Prokop, 2008)

MATERIAL	REFLEKTIVITÄT
Weißes Papier	bis zu 100%
Bauholz	94%
Schnee	80-90%
Bierschaum	88%
Kalkstein	bis zu 75%
bedruckte Zeitung	69%
zweilagiges Taschentuch	60%
Laubbäume	typ. 60%
Koniferen	typ. 30%
Karbonat Sand (trocken)	57%
Karbonat Sand (nass)	41%
Sandstrand	typ. 50%
Reflektorfolie 3M2000X	1250%
raue Ladeplatte	25%
Asphalt mit Kieselsteinen	17%
Lava	8%
schwarzer Neopren	5%
Schwarze Gummireifenwand	2%

Tabelle 1: Reflexionskoeffizienten für diffus reflektierendes Material bei 900 nm Wellenlänge (Redl, 2005)

### 1.3. Vergleich des Laserscans mit anderen Aufnahmemethoden

Bevor es Laserscanner für das terrestrische Vermessen gab, war die herkömmliche Methode Geländedaten mittels Photogrammetrie oder durch Vermessung mit Hilfe eines Theodolits zu erheben. Es sollen hier kurz die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden aufgezählt werden.

Vor- und Nachteile der Photogrammetrie:

- + Schon bei relativ kleinem Aufwand kann man hohe Genauigkeiten erreichen.
- + Die Aufnahmemarbeiten sind relativ schnell abgeschlossen, daher muss man sich nur kurz beim Objekt aufhalten.
- + Durch die aufgenommenen Fotos erhält man schnell und einfach Informationen über Farbe, Zustand und Geometrie (Ecken und Kanten) der Objekte.
- + Die Datenmenge ist gering im Vergleich zum Laserscan.

- + Die Bilder können, wenn sie gespeichert werden, der Beweissicherung dienen.
- + Die Bilder sind in sehr hoher Auflösung verfügbar.
- 3D-Informationen eines gewünschten Punktes können nur erstellt werden, wenn dieser auf zwei oder mehreren Bildern abgebildet ist.
- Eine Orientierung der Aufnahmen erfolgt für gewöhnlich erst bei der Datenverarbeitung.
- Da das Fotografieren ein passiver, lichtabhängiger Prozess ist, ist man dabei von den gegebenen Lichtverhältnissen abhängig.

#### Vor- und Nachteile beim Arbeiten mit Theodoliten:

- + Durch das Abgehen des Zielorts mit der Reflektorstange ist man in direktem Kontakt mit dem Gelände oder dem Objekt. Dadurch können Gelände- oder Objekteigenschaften besser erfasst und eingeschätzt werden und besondere Punkte gezielt eingemessen werden.
- Das Vermessen mit Theodolit ist sehr zeitaufwendig.
- Bei der Vermessung muss man möglicherweise Gefahrenzonen betreten, da man mit der Reflektorstange zu den Punkten von Interesse muss.
- Die Punktdichte ist viel geringer als bei anderen Methoden.

#### Vor- und Nachteile des Laserscannens:

- + Im Vergleich zu anderen Aufnahmemethoden nimmt der Laserscan extrem viele Punkte an der Objekt Oberfläche auf.
- + Man erhält direkt bei der Messung 3D-Daten.
- + Da der Laserscanner ein aktiver Sensor ist, ist man unabhängig vom Umgebungslicht.
- + Durch die vermessenen Reflektoren (Verknüpfungs- und Orientierungspunkte) ist eine Orientierung während der Aufnahme möglich.
- Man hat keine oder, falls ein RGB-Sensor vorhanden ist, nur mäßige Farbinformationen. Viele Laserscanner haben allerdings montierte und kalibrierte Kameras um ausgezeichnete Farbinformationen zu sammeln.

- Ecken und Kanten führen zu Fehlermessungen und sind – ohne Zuhilfenahme anderer Medien wie zum Beispiel Fotos – relativ schwer zu interpretieren.

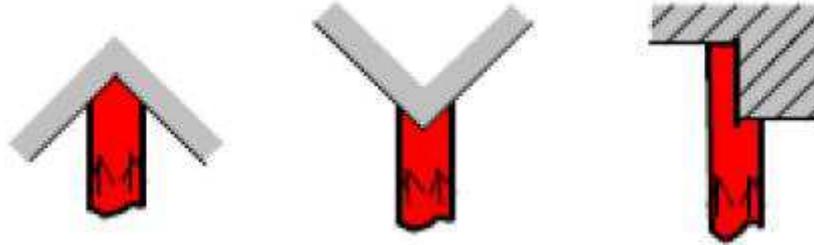


Abbildung 7: Fehlerhafte Distanzmessung des Lasers bei Ecken und Kanten (Redl, 2005)

Daher empfiehlt es sich ein hybrides System zu nutzen, welches verschiedene Methoden und deren Vorzüge kombinieren kann. In dieser Diplomarbeit wurde eine Kombination aus Scanner und kalibrierter Kamera, welche starr auf dem Scanner montiert ist, verwendet. (Siehe Kapitel 3.1.)

#### 1.4. Terrestrisches, mobiles und Airborne Laserscanning

3D – Laserscanning basiert auf LIDAR – Technologie (LIDAR – Laser Identification Detection and Ranging oder Laser Erkennung und Entfernungsmessung).

Beim Scannen wird der Laserstrahl mittels eines rotierenden oder oszillierenden Spiegels abgelenkt. Die aufeinander folgenden Messungen ergeben eine vertikale Scanlinie. Ein Scanner vollbringt dadurch viele (bis zu Millionen) einzelne Distanzmessungen pro Sekunde.

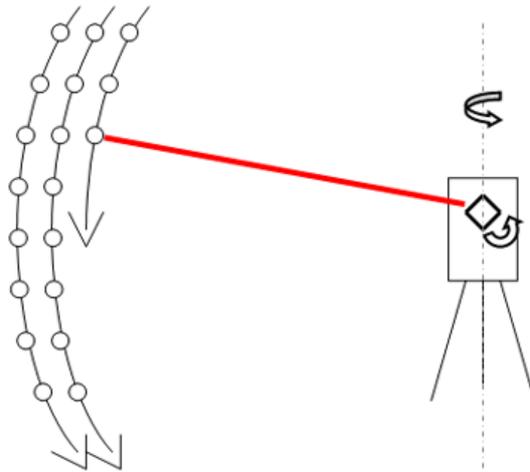


Abbildung 8: Messprinzip eines terrestrischen Laserscanners (Lösler)

Instrumente, welche Scanlinien produzieren, sind als Profilscanner oder 2D – Scanner bekannt. Für 3D – Vermessungen eines Schauplatzes ist eine zweite Bewegung in horizontaler Richtung notwendig. Deswegen drehen sich 3D – Scanner um ihre eigene Achse, da so ein bis zu 360° umfassendes Sichtfeld aufgenommen werden kann. Die vertikalen Scanlinien werden horizontal aneinander gereiht und ergeben so eine 3D – Repräsentation der gescannten Umgebung. Bei mobilen oder Airbornescannern wird die zweite Bewegungsrichtung durch das Trägerfahrzeug erzeugt.

Die 3D – Daten sind sofort bildlich dargestellt und abrufbar – eine photorealistische, farbige und präzise Repräsentation der gescannten Szene bestehend aus Millionen von einzelnen Distanzmessungen. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

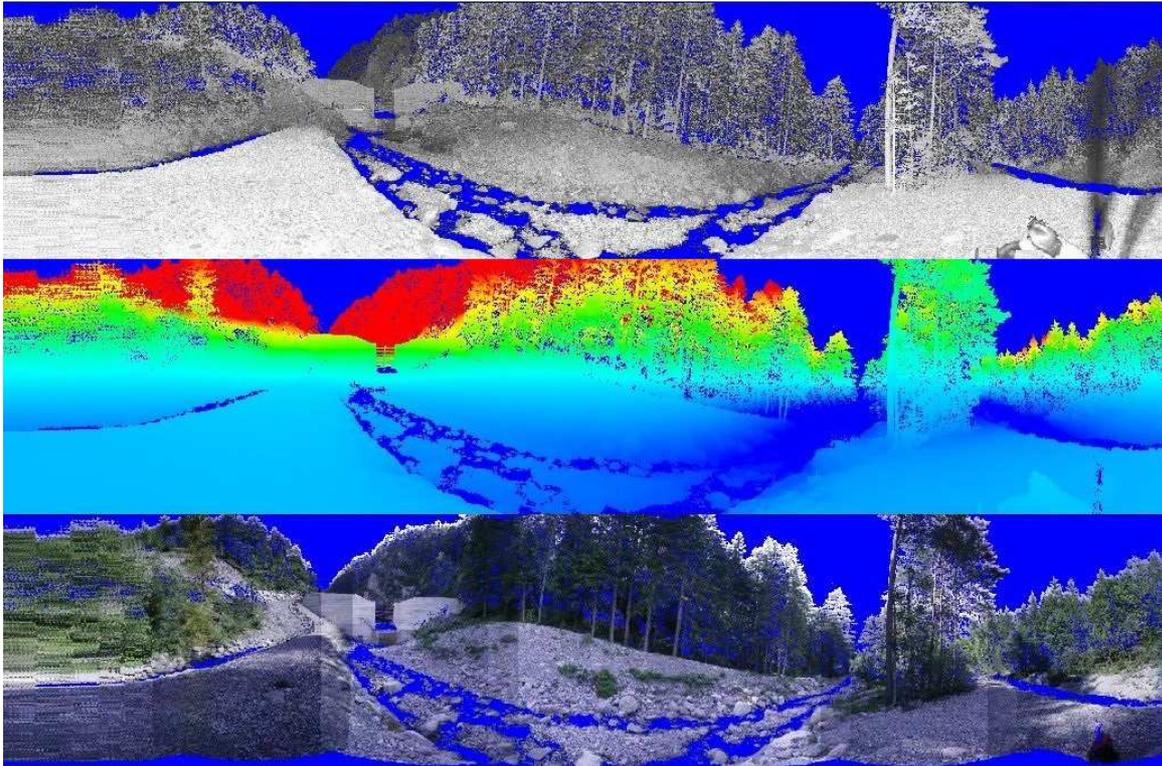


Abbildung 9: Reflexionsintensitätsbild (Graustufen) (oben), Falschfarbenbild (nach Höhe eingefärbt) (Mitte), RGB-Bild welches mittels der Fotos der montierten Kamera eingefärbt wurde (unten) (Prokop, et al., 2011)

#### 1.4.1. Terrestrisches Laserscanning

Die von RIEGL angebotenen terrestrischen Laserscanner liefern sehr schnell und effizient detaillierte und höchst präzise 3D – Daten. Die Instrumente decken einen sehr breit gefächerten Anwendungsbereich einschließlich Topographie, Bergbauindustrie, Bestandsvermessung, Architektur, Archäologie, Monitoring, Stadtmodellierung und Bauingenieurwesen ab.

Für stationäre Scans wird das Instrument, meist in Kombination mit einer kalibrierten hoch auflösenden Kamera und einer GPS – Antenne, welche auf dem Scanner montiert sind, auf einem Dreibein montiert und auf mehreren, um das Zielobjekt verteilten Positionen aufgebaut. Jede Scanposition ergibt eine genaue 360° - Punktwolke. Die einzelnen Punktwolken werden zusammengesetzt zu einem gut organisierten Daten-File und einer kompletten Punktwolke, welche den Scanort darstellt.

Terrestrisches Laserscanning (TLS) wird oft zum Vermessen von sich ändernden Orten verwendet: Beim Vergleich von aufeinander folgenden Scandurchgängen können Differenzen sehr leicht berechnet werden. Dieses Feature ermöglicht zum Beispiel Volumsberechnungen im Bergbau, sowie Monitoring bei Erdbeben, Felswänden, Lawinen und vielem mehr.

Die Methode der Laufzeitmessung erlaubt sehr zuverlässige Ergebnisse über große Entfernungen. Deswegen können Laserscanner sogar in Situationen zum Einsatz kommen, in denen wegen topographischer Eigenschaften oder Naturgefahren ein Messen im Nahbereich des Ziels nicht möglich ist.

Wenn Gebäude oder Industrieinfrastruktur gescannt wird, ist das gewünschte Ergebnis eines 3D – Scans meist ein 2D – Produkt. Da ein Scanner wesentlich schneller arbeitet als traditionelle Vermessungsmethoden, ist ein Scanner eine sehr effektive Möglichkeit 2D – Lagepläne, Baupläne, Orthofotos, CAD – Zeichnungen und vieles mehr zu erstellen.

Zusätzlich enthalten die Daten aus einem Scanner Informationen über die gescannten Oberflächen, da das Echosignal vom Ziel, das ist jeder einzelne gemessene Punkt, in Bezug auf die Reflexionseigenschaften ausgewertet wird. So kann Oberflächenmaterial und Oberflächenfarbe beschrieben oder sogar automatisch erkannt werden.

Da terrestrische Laserscanner sehr vielseitige, einfach zu handhabende Instrumente sind, eignen sie sich neben topographischen Aufgaben auch für beispielsweise polizeiliche Vermessungsarbeiten nach einem Verkehrsunfall oder an Tatorten. In einem sehr schnellen Scandurchgang können beteiligte Fahrzeuge, Verkehrsschilder und sogar Bremsspuren am Asphalt gescannt und für weitere Aufgaben aufbereitet werden. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

### 1.4.2. Mobile Laserscanning

Eine mobile Scan – Einheit besteht aus einem oder mehreren 2D – Scannern und zusätzlichen Sensoren, welche auf einer mobilen Plattform montiert sind. Diese Plattform wiederum kann auf jedem gewünschten Fahrzeug, beispielsweise Auto, Zug oder Schiff, montiert werden.

Die einzelnen Sensoren, welche eine genaue Information über die Position, die Orientierung und den Zeitpunkt jeder einzelnen Messung aller Scanner und Kameras liefern, erlauben es, auch bei hohen Geschwindigkeiten und starken Bewegungen des Trägervehikels oder rauen Umweltbedingungen eine zusammenhängende Punktwolke aufzunehmen.

Die Dichte der Punktwolke ist abhängig von der Geschwindigkeit des Trägerfahrzeuges und der Scannerleistung. Die Genauigkeit der Daten hängt wesentlich von einer starren Montage der Scanner – Einheit am Trägerfahrzeug, der Kalibration und einem äußerst sorgfältigen Management aller Systemkomponenten ab.

Mobiles Laserscanning (MLS) wird hauptsächlich bei Autobahnvermessungen, topographischen Aufgaben oder Stadtmodellierung verwendet. Wieder ist der große Vorteil die hohe Geschwindigkeit mit welcher die Daten aufgenommen werden können. Dadurch müssen Autobahnen oder stark frequentierte Verkehrswege nicht gesperrt werden, um sie zu vermessen.

Um der Bildung von Scanschatten vorzubeugen, welche durch vorbeifahrende Autos oder Personen verursacht werden und die Sicht des Scanners zum Ziel (zB einer Fassade) verdecken, werden die Daten von zwei Scandurchgängen in entgegengesetzten Richtungen kombiniert. Die Punktwolke nimmt an Einzelheiten und Genauigkeit zu, da der Laser unterschiedliche Ziele aus einem anderen Winkel erreicht und Objekte, welche nur in einem Scan vorkommen, beispielsweise vorbeifahrende Autos, automatisch gelöscht werden.

Bei Anwendungen des Mobile Laserscanning für den Bahnverkehr wird die Scannereinheit auf einem Triebwagen montiert. Dabei liegt das Hauptinteresse üblicher Weise in der Trassenvermessung bezogen auf Lichthöhe und

Abstandsmaße, im Erkennen von Hindernissen wie Bewuchs und baulichen Elementen und im Vermessen von Tunnels. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

### 1.4.3. Airborne Laserscanning

Unter Airborne Laserscanning (ALS) versteht man das Erheben von 3D – Daten mittels einem oder mehreren 2D – Scannern kombiniert mit Positions- und Höhenmesssystemen auf einer Plattform, welche von einem Flugzeug, einem Hubschrauber oder einer Drohne getragen wird oder darin eingebaut ist.

Je nach Aufgabe, Aufnahmegebiet und Fluggerät können verschiedene Scannertypen eingesetzt werden. Für Bathymetrie (Vermessung der topographischen Gestalt der Meeresböden) muss beispielsweise ein Laser mit einer Wellenlänge verwendet werden, die Wasser durchdringen kann.

ALS ist eine ideale Lösung, um große Flächen in sehr kurzer Zeit zu vermessen. Weiters ermöglicht ALS die Überwachung und Vermessung von schwer erreichbaren Orten wie beispielsweise großen Industriewerksanlagen.

Ein besonderer Aufgabenbereich ist die Bestandsaufnahme in forstwirtschaftlicher Hinsicht. Abhängig davon, welcher Laser verwendet wird, können mehrere Ziele in einer Richtung aufgenommen werden. Es gibt ein Echo vom ersten Ziel (zum Beispiel einem Blatt), der Laser dringt aber weiter vor und so können mehrere Echos von weitem Blättern, Zweigen, Bodenvegetation und dem Boden aufgenommen werden.

Basierend auf spezieller Verarbeitung und Analyse der erhaltenen Echosignale können die Daten eindeutig interpretiert werden. Dadurch ist es sehr einfach, die Daten zu filtern und ein digitales Geländemodell (DTM – Digital Terrain Model) zu erhalten. Gleichzeitig ermöglicht es die Beobachtung von Veränderungen in der Biomasse, der photosynthetischen Aktivität und des Wandels durch klimatische Veränderung. Um die Signifikanz der Daten weiter zu verbessern können

zusätzliche Sensoren wie Wärmebildkameras das System ergänzen. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

## 2. Zielsetzung

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ist, anhand zweier komplett unterschiedlicher Projekte zu veranschaulichen, dass sowohl eine über mehrere Jahre andauernde, als auch eine nur für ein Einzelereignis (Lawinenabgang) durchgeführte Messung mit einem Laserscanner anschauliches Datenmaterial zur Massenbilanzierung im Bereich der alpinen Naturgefahren liefert.

Als Beispiel für ein Langzeitmonitoring wurde das EU-LIFE-Projekt „Obere Drau“ herangezogen. (Prokop, et al., 2011) Zur Veranschaulichung einer Kurzzeitstudie diente die Aufnahme einer Lawine am Testgelände „Col du Lautaret“ des IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture). (Prokop, et al., 2014)

Beide Projekte sind mittlerweile abgeschlossen und wurden als Bericht bzw als Paper offiziell veröffentlicht. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird immer wieder Bezug auf diese beiden Projekte genommen. Um den Lesefluss nicht zu stören wird nicht bei jeder Bezugnahme das spezifische Projekt als Quelle angeführt.

Im Zuge des EU-LIFE-Projekts „Obere Drau“ wurden Geschiebeumlagerungen nach der Errichtung einer neuen Geschiebesperre in Schlitzbauweise zu mehreren Messzeitpunkten erhoben. Es wurde eine bestehende Geschiebestausperre abgetragen und anstelle dieser eine durchlässige Schlitzsperre errichtet, um in Zukunft einen Geschiebetransport bei Hoch- und Mittelwasserstand bis in die Drau zu gewährleisten und damit der Tiefenerosion der Drau vorzubeugen. Der Geschiebetransport ist ein Umlagerungsprozess, der in mehreren Stufen abläuft, da es vor der Dotation in die Drau zu mehrmaligem Ab- und Umlagern, bedingt durch die jeweilige Hoch- bzw Mittelwassersituation, kommt. Dabei waren genaue Mengen an Geschiebe und die flächige Verteilung der Umlagerung noch nicht gut erhoben.

Anhand mehrerer Messungen des Projektgebiets sollte festgestellt werden, wie viel Geschiebe oberhalb der neuen Schlitzsperre erodiert wurde, wie viel davon am Schwemmkegel abgelagert wurde und wie viele Kubikmeter schlussendlich in die Drau transportiert werden.

Im Zuge des Projekts am Col du Lautaret wurde ein Hang vor und nach einer künstlichen Lawinenauslösung gescannt. Grundsätzlich wird in der Schnee- und Lawinenforschung terrestrisches Laserscanning immer häufiger verwendet, um Schneehöhen über Flächen bis zu mehreren Quadratkilometern exakt zu vermessen und zu kartieren.

Schlüsseleingangsparameter bei der dynamischen Lawinenmodellierung sind Anbruchzonen, Anbruchhöhen, das ausgelöste Schneevolumen in der Auslösezone und die abgelagerten Volumina in der Ablagerungszone, genauso wie Daten über mitgerissenen und abgelagerten Schnee in der Gleitbahn. (Gruber, et al., 2007) (Sovilla, et al., 2007) (Eglit, et al., 2005) (Sovilla, et al., 2002) (Sovilla, et al., 2007)

Die Höhe der Ablagerungszone (auch Lawinenkegel genannt) kann im Feld meist gemessen werden, die Anbruchzone hingegen kann vielerorts nur schwer oder gar nicht erreicht werden. Ferner macht die andauernde Lawinengefahr eine gefahrlose Untersuchung unter Umständen unmöglich.

Noch komplexer ist die Ermittlung des Gesamtvolumens des ausgelösten, mobilisierten und abgelagerten Schnees einer Lawine. Diese Aufgabe erfordert den Einsatz von Fernüberwachung um hochauflösende, räumliche Schneeoberflächeninformationen vor und nach dem Lawinenabgang zu erhalten. Terrestrische Laserscanner bieten eine Lösung für diese Aufgabe.

## 3. Methodik

### 3.1. Verwendete Laserscanner

Wenn man von einem 3D Laserscanner spricht, spricht man meist von einem System bestehend aus einem Scanner, einer darauf starr montierten Kamera und einem Laptop zur Bedienung der beiden Geräte.

#### 3.1.1. LMS – Z420i

Das terrestrische Laserscansystem RIEGL LMS – Z420i besteht aus einem 3D – Hochleistungslangstreckenscanner, dem Bedienungs- und Verarbeitungssoftwarepaket RiSCANPRO und einer kalibrierten, exakt orientierten und auf dem Scanner montierten hochauflösenden Digitalkamera.

Das System erstellt Daten, welche sich für automatische oder halbautomatische Datenverarbeitung von Scan- und Bilddaten eignen, um Produkte wie texturierte, triangulierte Oberflächen oder Orthofotos mit Tiefeninformationen zu erstellen.

Der LMS – Z420i ist ein stabiler, transportfähiger Scanner, der speziell entwickelt wurde, um durch die Kombination aus großem Sichtfeld, hoher Maximalreichweite und hoher Datenaufnahmegeschwindigkeit eine schnelle Datenerfassung auch in schwierigem Gelände zu ermöglichen.

Ein normales Notebook mit Windows – Betriebssystem und dem Softwarepaket RISCAN Pro ermöglicht es dem Benutzer vor Ort qualitativ hochwertige 3D – Daten zu erhalten und liefert eine Vielfalt an Registrierungs-, Nachbearbeitungs- und Exportfunktionen.

Der Scanner hat eine Maximalreichweite von 1000 Metern mit Laser Class 1, welche augensicher ist, und einem Sichtfeld von 80° x 360° bei einer Messrate von 11000 Punkten pro Sekunde. Die montierte Kamera ist eine Nikon, Modell D700.

Die Entfernungsmesselektronik des Scanners ist für höchste Geschwindigkeiten optimiert, um ein möglichst schnelles Messen zu ermöglichen. Die Vertikalablenkung („line scan“) des Laserstrahls wird durch ein Polygon mit mehreren reflektierenden Oberflächen ermöglicht. Für hohe Scanraten und/oder einem Scanwinkel  $\theta$  80° rotiert der polygonale Spiegel konstant bei wählbarer Geschwindigkeit. Für niedrige Scanraten und/oder kleine Scanwinkel oszilliert der Spiegel auf und ab. Der horizontale Scan („frame scan“) wird durch die Rotation um die Scannerachse (360°) ermöglicht.

Die Scandaten beinhalten Information über Entfernung, Winkel, Signalamplitude und Zeitmarke. Diese werden via TCP/IP – Kabel oder W – Lan an den Laptop geleitet. Die Daten aus der montierten Kamera werden via USB oder Firewire weitergeleitet. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

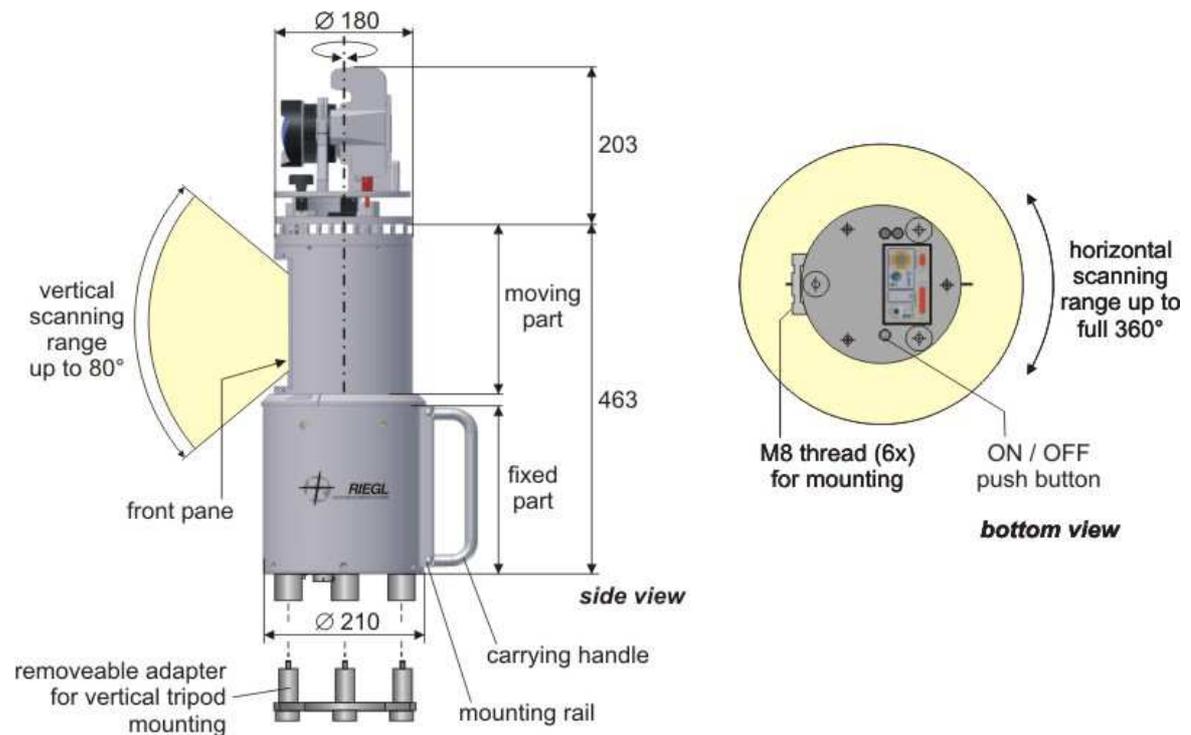


Abbildung 10: technische Daten LMS-Z420i (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

Reichweite für natürliche Ziele, $\rho \geq 80\%$ für natürliche Ziele, $\rho \geq 10\%$	bis 800m bis 250m
Minimale Messdistanz	2 Meter
Messgenauigkeit	typ. $\pm 10\text{mm}$ (Einzelmessung) typ. $\pm 5\text{mm}$ (gemittelt)
Messauflösung	5 mm
Messrate	bis 12000 Punkte pro Sek. bei niedriger Scanrate (oszillierender Spiegel) bis 8000 Punkte pro Sek. bei hoher Scanrate (rotierender Spiegel)
Wellenlänge des Lasers	nahes Infrarot
Strahldivergenz	0.25 mrad (entspricht einer Abtastfleckgröße ( <i>Footprint</i> ) von 2.5mm des Signals in 10m Entfernung)

Tabelle 2: technische Daten LMS-Z420i (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

### 3.1.2. LPM – 321

Das Laserprofilmesssystem RIEGL LPM – 321 bietet hohe Flexibilität bei 3D – Messungen über große Distanzen, hemispherisches Scannen und reflektorloses Distanzmessen auf bis zu 6000 Meter Entfernung mit hoher Genauigkeit. Wie auch bei dem LMS – Z420i ist, um den Scanner zu bedienen, ein umfangreiches Bedienungssoftwarepaket (RiPROFILE) notwendig, welches auf jedem Laptop oder PC mit Windows Betriebssystem läuft.

Die zu messende Entfernung wird mittels der Laufzeitmessung des Laserstrahls errechnet und kann ohne die Verwendung von Reflektoren ermittelt werden. Durch die Kombination von spezieller Signalaufbereitung und Analyse der reflektierten Strahlen wird eine präzise Distanzmessung selbst unter schlechten Sichtbedingungen möglich. Bei Messungen mit mehreren Zielen kann der Distanzmesser bis zu drei Zieldistanzen pro Messung angeben.

Der Punkt an dem der Laserstrahl auftreffen soll kann mittels montiertem Zielfernrohr gesehen und dadurch vorher ausgewählt werden. Dies ist dann von Vorteil, wenn man nur einen kleinen Bereich in größerer Entfernung vermessen möchte. Nach manueller Voreinstellung mittels Zielfernrohr und Handbedienrad wird der Laserstrahl durch die Schwenk- und Kippmontage und den eingebauten Schrittschaltmotoren mit einer Genauigkeit von  $0,009^\circ$  automatisch positioniert.

Durch die Kombination des Scanners mit einer kalibrierten, orientierten und starr montierten hochauflösenden Digitalkamera entsteht ein hybrides Sensorensystem. Dieses generiert Daten, welche sich zur automatischen oder halbautomatischen Weiterverarbeitung von Scan- und Bilddaten eignen, um Produkte wie eingefärbte Punktwolken, texturierte triangulierte Oberflächen und hoch auflösende Panoramabilder zu erstellen, die beispielsweise als Basis für geotechnische Analysen und Bergabbauabschätzungen dienen können. (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

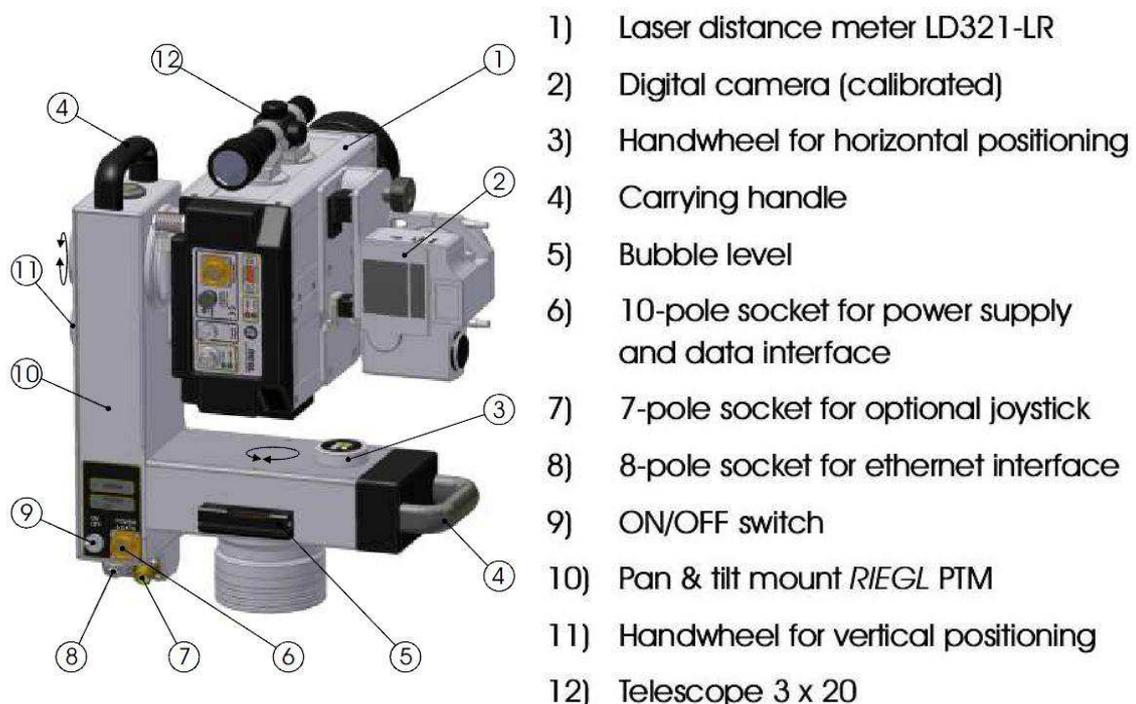


Abbildung 11: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

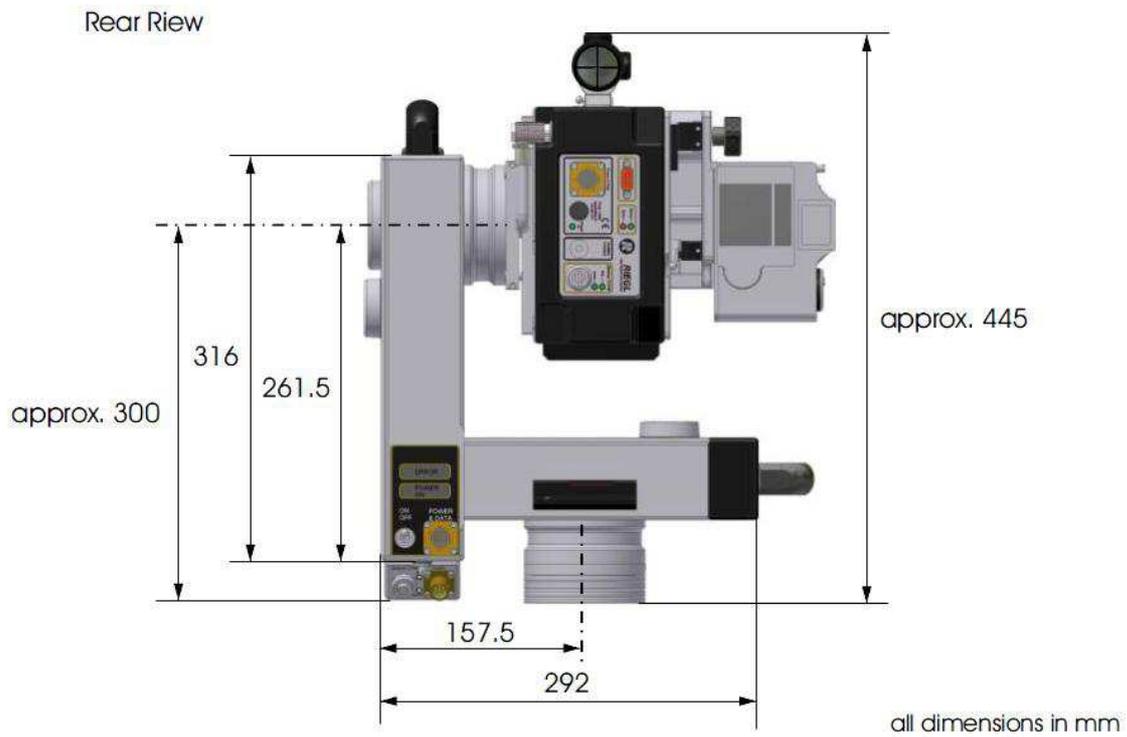
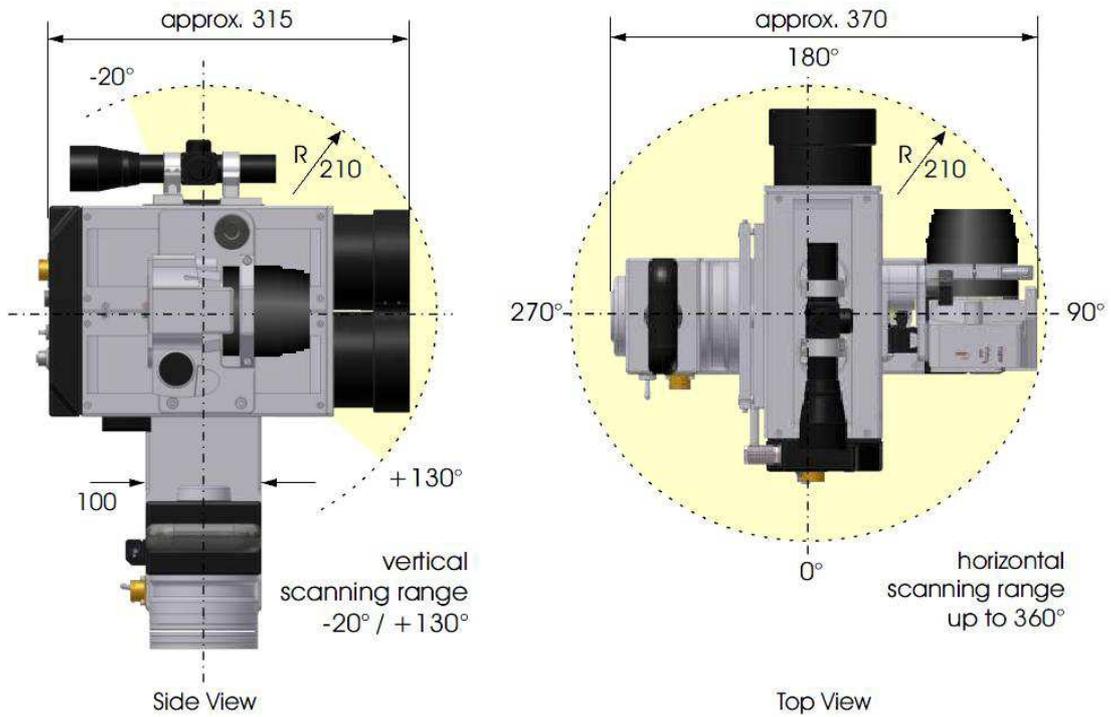


Abbildung 12: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

Reichweite	1000 Hz	100 Hz	10 Hz
für natürliche Ziele, $\rho \geq 80\%$	$\geq 1500$ m	$\geq 2500$ m	6000 m
für natürliche Ziele, $\rho \geq 10\%$	$\geq 500$ m	$\geq 850$ m	$\geq 1500$ m
Minimale Messdistanz	10 m		
Messgenauigkeit	bei normaler Messung 25 mm bei Präzisionsmessung 15 mm		
Messrate	10 bis 1000 Punkte/sec.		
Wellenlänge des Lasers	nahes Infrarot		
Strahlendivergenz	0,8 mrad (entspricht einer Abtast fleckgröße von 8 mm des Signals in 10 m Entfernung)		

Tabelle 3: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

### 3.1.3. Reflektoren

Die Reflektoren werden als Kontroll- und Verknüpfungspunkte am Zielobjekt und in dessen Umgebung angebracht, um die Punktwolken der einzelnen Scans im gewünschten Koordinatensystem zu orientieren und zu verknüpfen. Die flachen, kreisrunden Reflektoren mit 50 mm Durchmesser und zentriertem Loch von 3 mm Durchmesser (um sie mit dem Theodolit genau einmessen zu können) sind selbstklebend und können daher auf jeder Oberfläche angebracht werden. Es gibt auch zylindrische Reflektoren (50 mm Durchmesser x 50 mm Höhe), die von jeder Seite gescannt werden können. Diese werden aber nur verwendet, wenn sie vor dem Scan mittels DGPS (Differential Global Positioning System) eingemessen werden können.

Von Seiten der Firma Riegl wird empfohlen, vier bis acht eingemessene Reflektoren mittels Feinscan zu scannen, um genaue Ergebnisse bei der Orientierung und Verbindung der einzelnen Scans zu erzielen. Die Reflektoren sollten in möglichst allen Richtungen gleichmäßig um den Scanner verteilt sein. Reflektoren, die in einer Linie oder in einem gleichseitigen Dreieck angebracht wurden stellen ein Problem für den Algorithmus der Software dar.

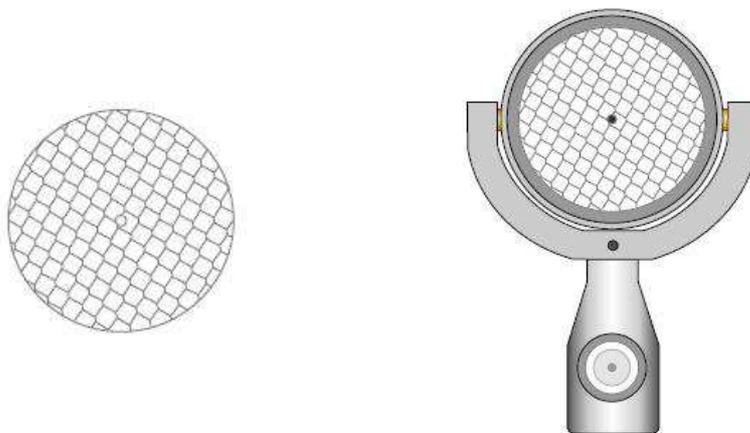


Abbildung 13: technische Daten Reflektor (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012)

### 3.2. Laserscanning und Datenverarbeitung am Col du Lautaret

Um durch Lawinen verursachte Veränderungen in der Schneeoberfläche festzustellen muss man zwei aufeinanderfolgende Scandurchgänge des Lawinenstrichs machen – einen vor und einen nach der Lawinenauslösung.



Abbildung 14: Der LPM-321 und die zu untersuchende Lawine am Col du Lautaret, die am 13. Februar 2013 ausgelöst wurde; die zu scannende Fläche ist durch die rote Linie eingegrenzt. (Prokop, et al., 2013)

Bei diesem Projekt wurde dafür ein RIEGL LPM – 321 Scanner verwendet. Die beste Horizontalauflösung der Punktwolke war 5 cm in einer Entfernung von 100 m zur Scanposition, das entspricht 25 cm bei einer Distanz von 500 m. Um die Scans miteinander vergleichen zu können muss man die beiden Punktwolken zueinander ausrichten. Für die Anpassung wurde ein „Iterativ-Nächster-Punkt-Algorithmus“ angewandt, welcher in RiPROFILE zu Verfügung steht und „Multi Station Adjustment“ heißt. (Besl, et al., 1992) Dieser Algorithmus funktioniert am besten bei ebenen Flächen. (Prokop, et al., 2009) Bei unserem

Projekt bot die Schneeoberfläche 24 solch passende ebene Flächen an mehreren Stellen im Hang. Durch den Multi Station Adjustment Algorithmus werden die Scanpositionen iterativ modifiziert. Dabei werden Passpunkte und ebene Flächenteile aus beiden Scans verwendet, um die genaueste Übereinstimmung zu finden. Zusätzlich dienen vermessene Ziele auf dem Hang als Passpunkte für die globale Registrierung der Scans. Die Standardabweichung zwischen den Passpunkten (Tie-points) und den ebenen Flächen beider Scans war +/- 2,53 cm.

Weiters wurde eine topographische Vermessung der Ablagerungszone (oder Lawinenkegel) mit einer Totalstation (TS Leica 02) durchgeführt, bei der ca 30 Punkte eingemessen wurden. Für diese Distanzmessung wurde ein Prismenreflektor verwendet, der bei einer Zieldistanz von 500 – 700 m einen Positionsfehler von nur wenigen Zentimetern garantiert.

Eine mittlere horizontale Orientierung wurde durch fünf Kontrollpunkte erstellt, um Koordinaten im französischen nationalen Koordinatensystem Lambert Zone III (konisch-konforme Lambert – Projektion auf einem Clarke Ellipsoid) zu erhalten.

In der Praxis kommt es zu einer gewissen Ungenauigkeit am Lawinenrand, da der Reflektor zwischen den Schneeböcken des Ablagerungsmaterials aufgrund des starken Zusammenhalts des Schnees nicht immer ganz genau an die gewünschte Stelle positioniert werden kann. In der Praxis ist es daher ausreichend genau, den Reflektor in einem Bereich von +/- 10 – 20 cm um den Rand zu platzieren.

Um die heterogen verteilte Punktwolke in eine Rasteroberfläche konvertieren zu können, wird die Natural Neighbor Interpolationsmethode angewandt. (Prokop, et al., 2009) In den entstehenden digitalen Raster-Schneeoberflächenmodellen (DSM – digital snowsurface model) werden die Anrisszone, die Gleitbahn und die Ablagerungszone dargestellt.

Die Abrisszone wurde als der Bereich definiert, in welchem der Schnee fehlt, begrenzt durch die Abbruchkante, und die Ablagerungszone, welche sich in den Verlangsamungsbereich und die eigentliche Ablagerungszone (Lawinenkegel)

unterteilt. Als Gleitbahn wird die Fläche definiert, in der die Lawine fließt und in welcher Schnee zwischen Anriss- und Ablagerungsfläche mobilisiert wird.

### 3.3. Laserscanning und Datenverarbeitung am Feistritzbach

Für die Messungen rund um den Feistritzbach wurde ein RIEGL LMS Z420i aufgrund seiner technischen Eigenschaften gewählt. Um das gesamte Gebiet abzudecken waren mehrere Scanpositionen nötig.

Die als Punktwolke im X, Y, Z – Format vorliegenden Scanrohdaten wurden zur besseren Visualisierung zusätzlich mit den Farbinformationen eingefärbt, welche mittels der kalibrierten Digitalkamera gewonnen wurden.



Abbildung 15: In RGB-Farben eingefärbte Punktwolke von der Sperre in Schlitzbauweise - die schwarzen Stellen sind Scanschatten, also Bereiche, die von dem ausgesandten Laserstrahl wegen Verdeckung nicht erreicht werden können. (Prokop, et al., 2011)

Damit die einzelnen Scandurchläufe untereinander verglichen werden können, wurde jede einzelne Scanposition durch Einsatz von differentialem GPS

registriert. Um ein mehrmaliges, genaues Registrieren zu ermöglichen wurden Reflektoren (kreisrunde selbstklebende Reflektorfolie von 50 mm Durchmesser – siehe Kapitel 3.1.3. Reflektoren) an starren, markanten Geländepunkten und an Stellen auf der Schlitzsperre angebracht. Diese Reflektoren wurden dann per GPS eingemessen und dienten damit für jeden Scan als Fix- und Passpunkte zur Registrierung und Verknüpfung der einzelnen Scanpositionen.

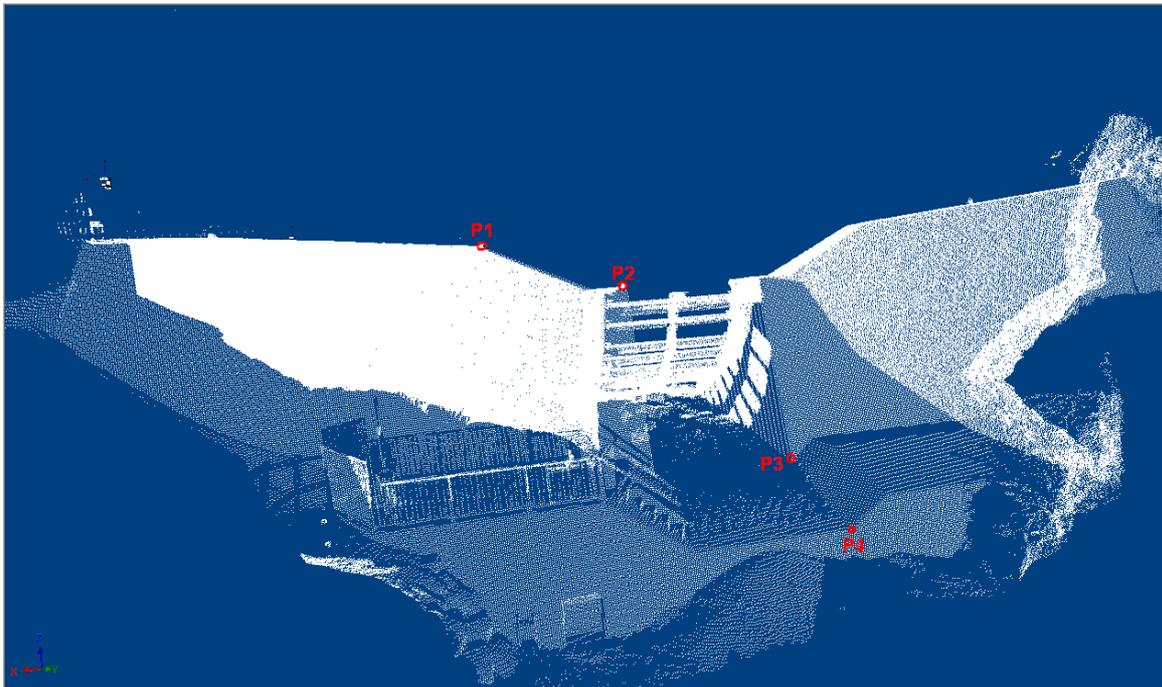


Abbildung 16: Punktwolke in Graustufen (Intensität der Reflexion) der Sperre - an den rot markierten Stellen wurden die kreisrunden Reflektoren angebracht, um den Scan genau referenzieren zu können. (Prokop, et al., 2011)

Der nächste Schritt im Workflow war das Filtern der Punktwolke wie in Abbildung 18 verdeutlicht. Um ein vergleichbares Oberflächenmodell zu schaffen, mussten das Projektgebiet nicht betreffende Punkte und Punkte der Vegetation entfernt werden. Das Einschränken des Gebiets war relativ einfach, da man die Punktwolke im RISCAN Pro öffnet und im Grundriss betrachtend, die überflüssigen Punkte am Rand löscht. Um die Vegetation bzw die Punkte zu löschen, welche keinen Boden darstellen, wurde eine Hilfsebene annähernd normal zur Flussbettachse im jeweiligen Scan eingezeichnet. Durch ein Tool von RISCAN Pro kann die Punktwolke in beliebig breite Streifen, parallel zu dieser

Hilfsebene, unterteilt werden. Anhand von Erfahrungswerten wurden zwei Meter breite Streifen gewählt, um dann in der Lage zu sein, die Punkte der Vegetation manuell zu löschen.

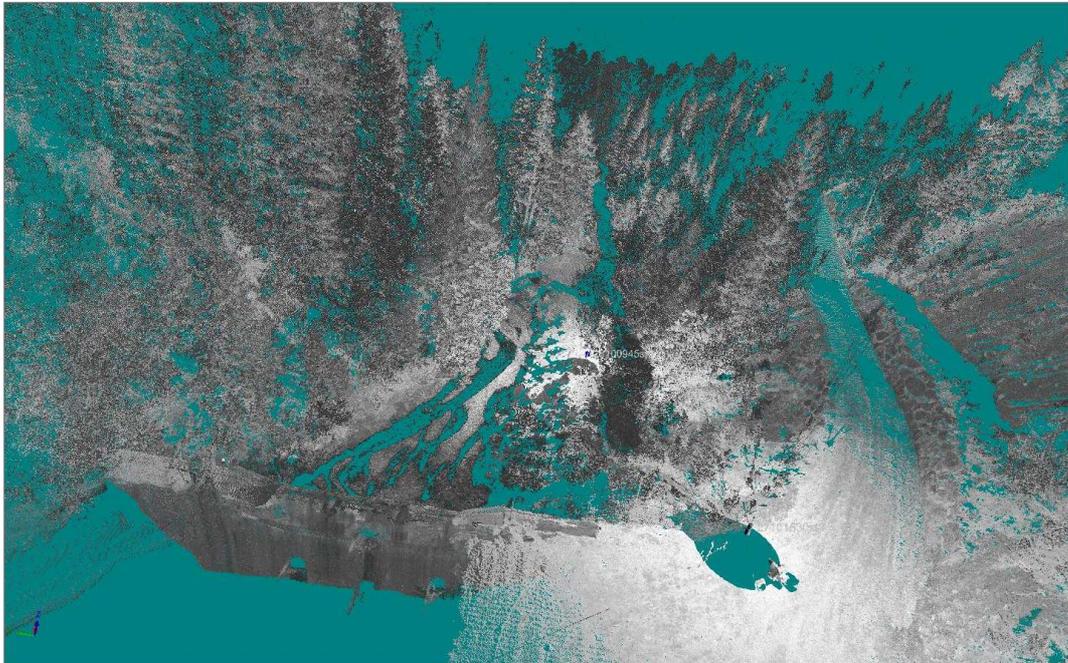


Abbildung 17: Die ungefilterte Punktwolke in Graustufen (Prokop, et al., 2011)

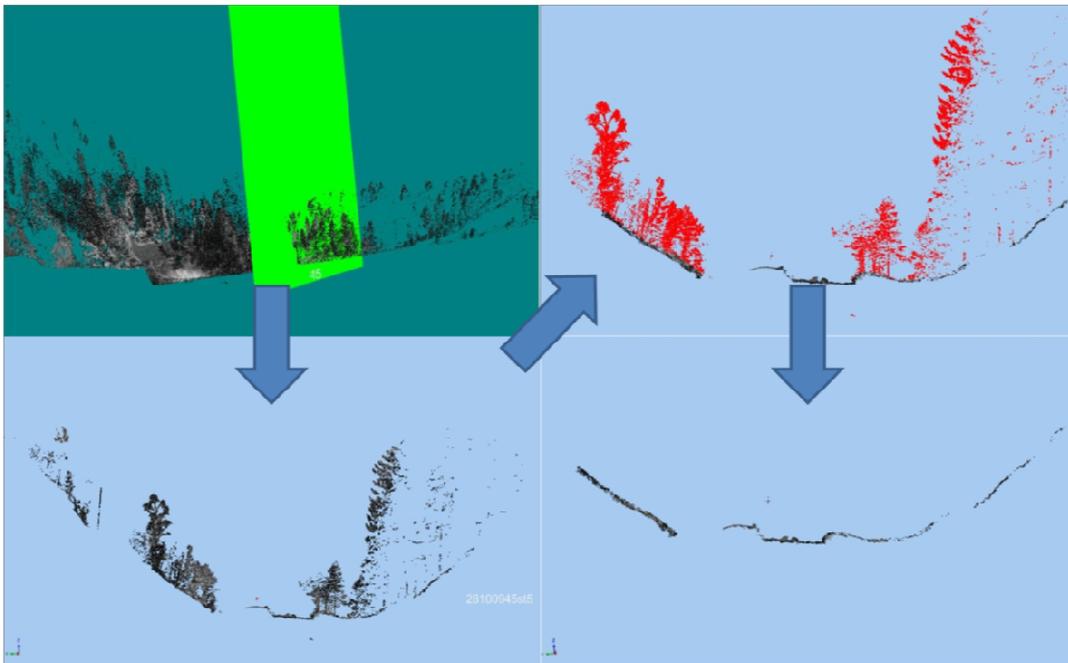


Abbildung 18: Workflow: links oben: die Hilfsebene - links unten: ein zwei Meter breiten Geländestreifen - rechts oben: Vegetation markiert - rechts unten: "gereinigter" Scanstreifen (Prokop, et al., 2011)

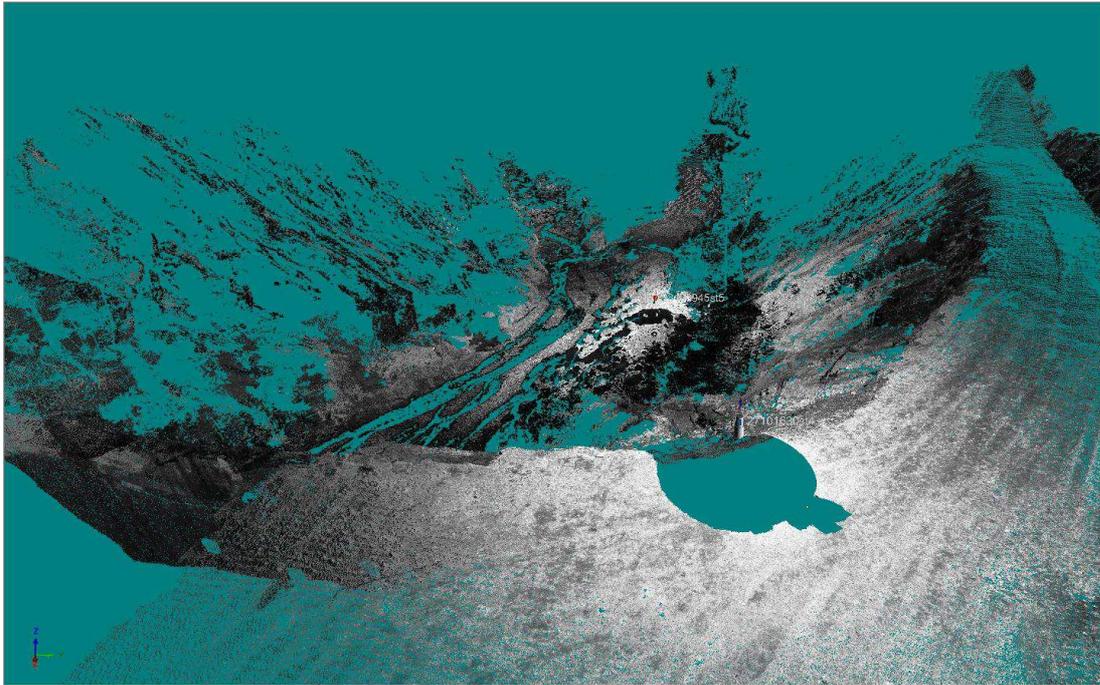


Abbildung 19: "gereinigte" Punktwolke in Graustufen (Prokop, et al., 2011)

Die gelieferten Scandaten wurden im ArcGIS mittels eines Natural-Neighbor-Interpolationsverfahren zu Oberflächen umgewandelt. Diese Oberflächen wurden mit einer Auflösung 0,5 m x 0,5 m pro Gridzelle generiert.

Im folgenden Schritt wurden dann abschnittsweise Oberflächen von zeitlich unterschiedlichen Scans verglichen und die Massendifferenz errechnet. Zum einen wurden Geschiebebilanzkarten, die die Höhendifferenz zwischen den unterschiedlichen Scanterminen anzeigen, erstellt. Zum anderen wurden dadurch auch die Geschiebevolumina berechnet, um die Menge des umgelagerten Geschiebes angeben zu können.

### 3.3.1. Messgenauigkeit

Laut Datenblatt der Firma RIEGL wird die Messgenauigkeit der reinen Distanzmessung von Scanner zur Oberfläche, des LMS Z420i mit 10 mm (bei 50 Meter Testbedingungen) angegeben. Zum Berechnen der Geschiebebilanz muss man zusätzlich den Registrierungsfehler der Scans zueinander, den atmosphärischen Fehler sowie die Fehler aus Filterung und Interpolation der Punktdaten berücksichtigen.

## 4. Untersuchungsgebiet

### 4.1. Col du Lautaret

Schon seit mehreren Jahrzehnten werden Lawinentestgebiete für Studien der Lawindynamik betrieben, wie beispielsweise in Valais in der Schweiz, in Ryggfjonn bei Grasdalen in Norwegen und seit 1972 im französischen Distrikt Hautes – Alpes zwischen Col du Lautaret und Col du Galibier. Ursprünglich gegründet, um Geräte zur künstlichen Auslösung von Lawinen zu entwickeln, wird das Testgelände am Col du Lautaret nun genutzt, um dynamische Prozesse von Lawinen und deren resultierende Kräfte beim Aufprall auf von Menschenhand geschaffene Einrichtungen zu erforschen. Das Gelände wird von der ETGR (Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches) Forschungsgruppe des IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) verwaltet und betreut. (IRSTEA, 2012)

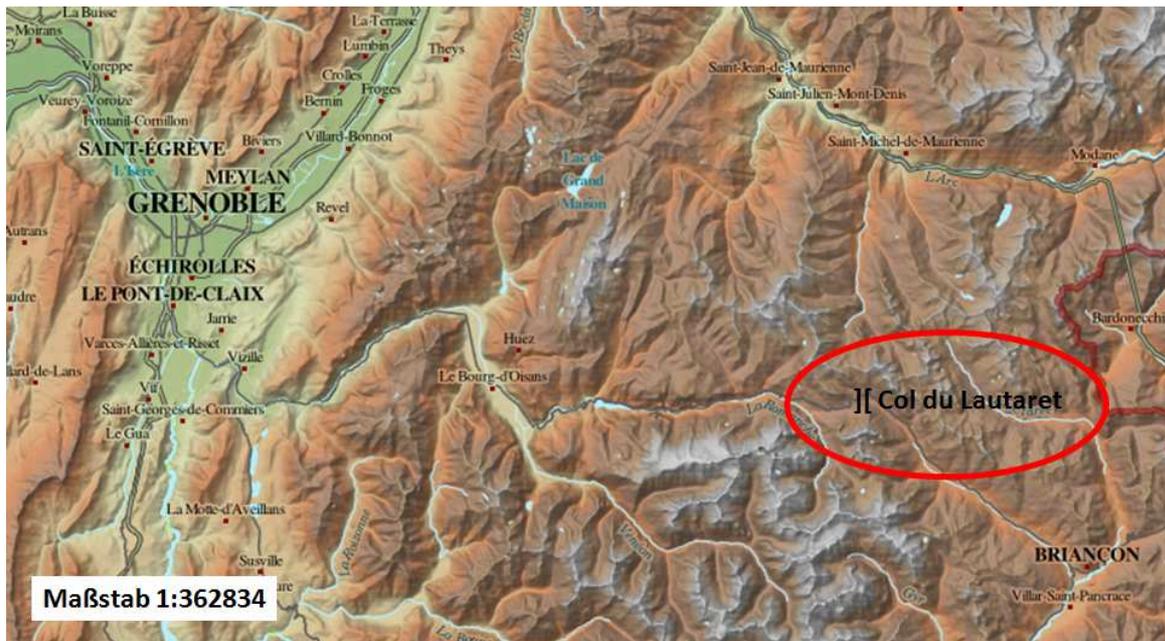


Abbildung 20: Übersichtskarte Col du Lautaret (FranceTopo)

Das Testgelände umfasst insgesamt acht Lawenstriche, von denen momentan zwei mit Instrumenten zur Lawinenforschung versehen sind. Gemessen werden Lawinenaufpralldruck, Fließgeschwindigkeiten und Fließhöhen. (Barbolini, et al., 2006) (Thibert, et al., 2008) Informationen über die Schneeeigenschaften werden durch Graben von Schneeprofilen in der Nähe der Anbruchzone erhoben. So erhält man Informationen über Schneedichte, Temperatur, Härte, Kornform und charakteristische Korngröße der einzelnen Schneesichten. Für dieses Projekt wurden Daten im Lawenstrich Nr.2, der sich an der Südostflanke des Montagne de Chaillol (2600m) befindet, erhoben. Dieser Lawenstrich ist 800 Meter lang mit einem Höhenunterschied von 450 Metern und einer durchschnittlichen Neigung von  $34^\circ$ . (Barbolini, et al., 2006) Die Lawinen werden durch eine GazEx – Anlage fernausgelöst. (Interfab Snowbusiness GmbH)

## 4.2. Feistritzbach

Der Feistritzbach liegt in Kärnten in der Gemeinde Berg im Drautal im Bezirk Spittal an der Drau, südlich der hohen Tauern zwischen der Kreuzeckgruppe und den Gailtaler Alpen und mündet orographisch gesehen von Süden in die Drau ein. Das Einzugsgebiet des Feistritzbaches setzt sich aus zwei Zubringereinzugsgebieten und dem eigentlichen Einzugsgebiet zusammen und hat eine Gesamtfläche von 14,94 km<sup>2</sup>.

Die Geologie des Einzugsgebietes, nämlich der Ochsen Schluchtklamm, setzt sich hauptsächlich aus Kalkstein, Dolomit und vereinzelt auch Sandstein zusammen. Dies ist auch unschwer anhand der Geschiebezusammensetzung zu erkennen. Im unteren Teil des Bachlaufes, knapp vor der Einmündung in die Drau ist das Gebiet geologisch als Schwemmkegel bzw Wildbachschutt klassifiziert.

Das Messgebiet des Projekts beginnt bei dem Retentionsbereich oberhalb der Sperre auf 645 m Seehöhe und endet nach einer Strecke von ca 1800 m bei der Mündung in die Drau auf 595 m Seehöhe.



Abbildung 21: Übersichtskarte Feistritzbach ([www.kagis.ktn.gv.at](http://www.kagis.ktn.gv.at))

Damit sich der Feistritzbach und in weiterer Folge die Drau auf Grund des Geschieberückhalts nicht weiter eintiefen wurde im Zuge des EU-LIFE-Projekts „Obere Drau“ die alte undurchlässige Geschiebesperre durch eine neue, in Schlitzbauweise gestaltete, Sperre ersetzt, um einen Abtrag des angesammelten Geschiebes im Retentionsbereich der alten Sperre zu ermöglichen und somit einen Weitertransport bis in die Drau zu gewährleisten.

## 5. Ergebnisse und Diskussion

### 5.1. Ergebnisse des Projekts vom Col du Lautaret

Die Lawine am Col du Lautaret wurde ungefähr um 12:00 Uhr ausgelöst. Zu der Zeit betrug die Lufttemperatur  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In Abbildung 22 ist die Gesamtschneehöhe vor der Auslösung zu sehen. Deutlich erkennt man, dass in der Mitte des Lawinenstriches am meisten Schnee abgelagert ist. Hingegen ist an den felsdurchsetzten Flanken fast kein Schnee zu erkennen. Durch den windverfrachteten Schnee ist der Geländeeinschnitt der Straße komplett ausgeglichen.

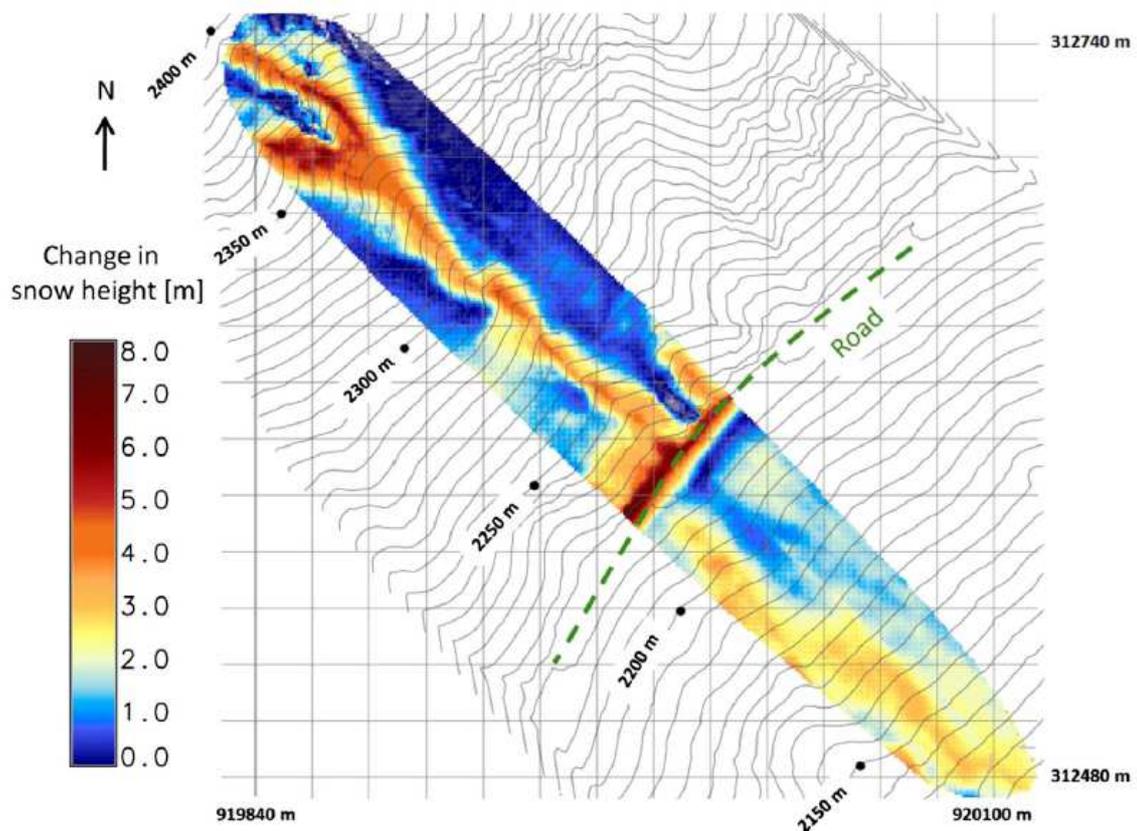


Abbildung 22: Totale Schneehöhe im Lawinenstrich vor der Auslösung. Als Referenz dienen ein 20 m Raster, 5 m Höhenschichtlinien (auf einem DEM basierend) sowie globale (Lambert, Zone III) als auch lokale Koordinaten. Die grün strichlierte Linie markiert die Straße, welche den Lawinenstrich kreuzt. (Prokop, et al., 2014)

Es wurde eine durchschnittlich 25 cm dicke Schneeschicht, bestehend aus durch Windverfrachtung zerstörte, abbauend umgewandelte Schneepartikel ausgelöst, die als Lawine abging. Es gab zwei Anbruchzonen: Die obere war eine Gruppe aus vier kleinen Flächen, wie in den Bildern der Zeitrafferkamera (Abbildung 23) aufgezeichnet wurde. Die untere lag, wie man in Abbildung 24 erkennen kann, 60 – 70 Meter weiter unten in der Lawinengleitbahn. Es ist nicht sicher, ob die zweite Auslösung eine Folge der vorbeifließenden ersten Lawine war, oder auch durch die GazEx-Explosion etwas zeitverzögert ausgelöst wurde.

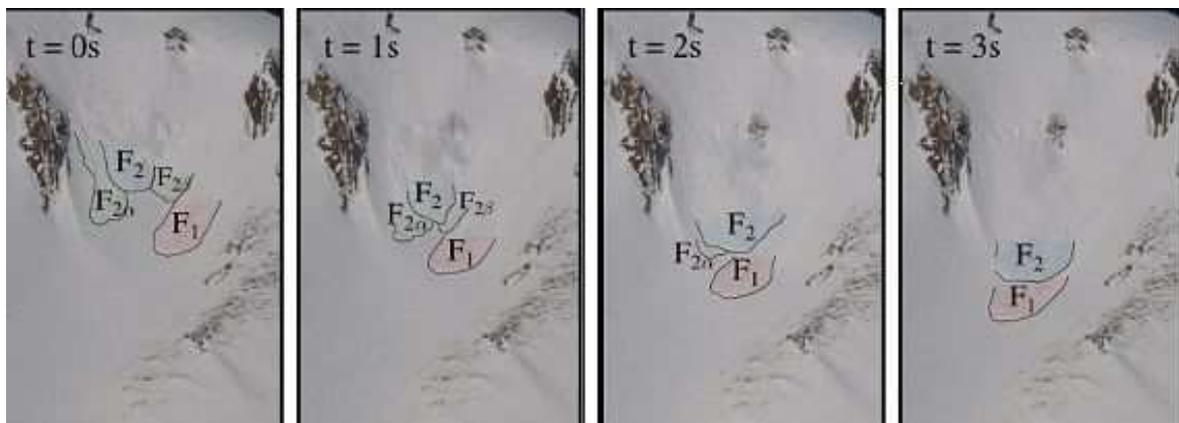


Abbildung 23: Die Entwicklung der Lawine im oberen Auslösebereich - man erkennt gut, dass sich die Lawine aus vier kleinen Auslösezonen zusammensetzt, welche erst nach ein paar Sekunden zusammen fließen. In der jeweils linken unteren Ecke der Bilder ist das Gebiet der zweiten Auslösezone. (Prokop, et al., 2013)

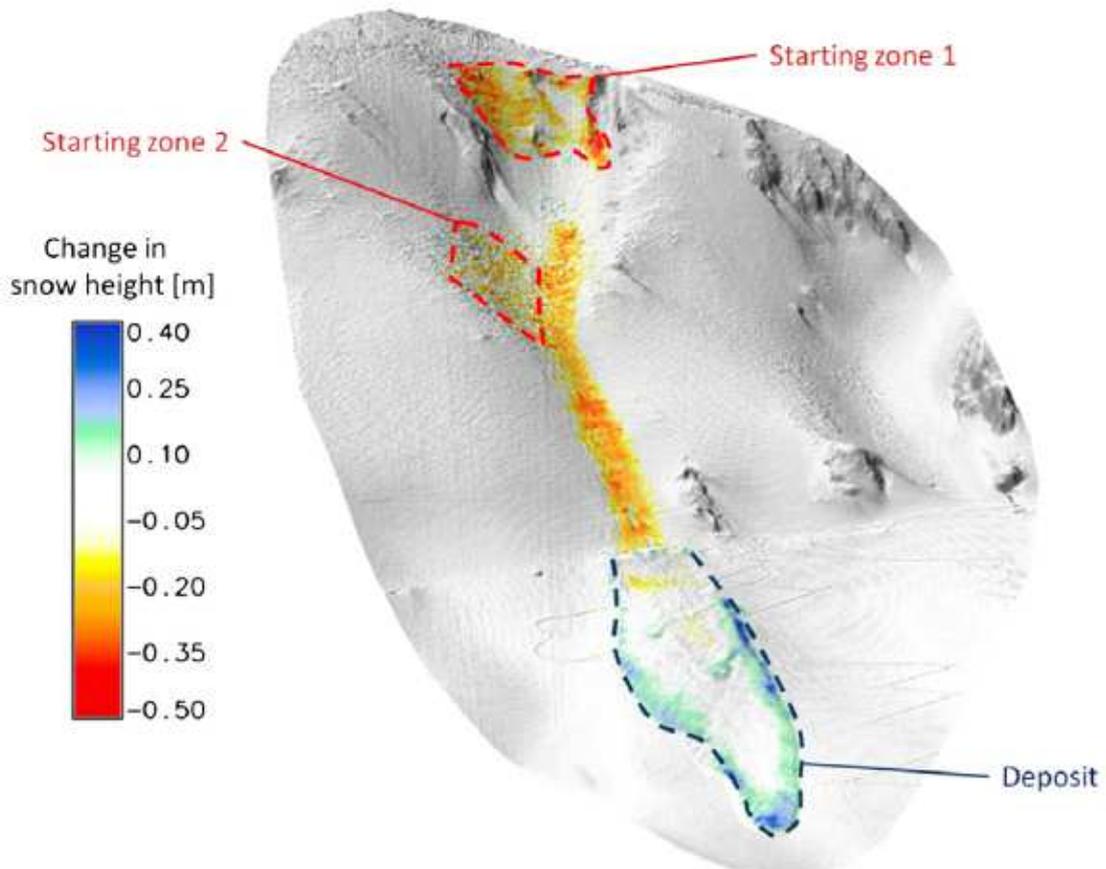


Abbildung 24: 3D-Ansicht des digitalen Schneeoberflächenmodells des zweiten Scans, nachdem die Lawine ausgelöst wurde. Man kann die durch die Lawine verursachten Änderungen der Schneehöhen und die zwei Anbruch-/Auslösezonen sowie die Ablagerungszone erkennen. (Prokop, et al., 2014)

Die durchschnittliche Schneedichte im Abbruchbereich war  $250 \text{ kg/m}^3$ . Sie reichte von  $220 \text{ kg/m}^3$  an der Oberfläche bis zu  $270 \text{ kg/m}^3$  an der Unterseite der Schneeschicht. In der abgegangenen Scholle war die Korngröße kleiner als  $0,5 \text{ mm}$ . Die Schneetemperatur lag zwischen  $-4,7 \text{ }^\circ\text{C}$  an der Oberfläche und  $-7,4 \text{ }^\circ\text{C}$  an der Unterseite der ausgelösten Schneeschichten. Die durchschnittliche Schneetemperatur in der ausgelösten Schneeschicht war  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Schneehärte wurde nach dem Hand-Index mit „Faust“ angegeben und als Äquivalent zu  $20 \text{ N}$  Rammwiderstand gemessen. Der Hand-Index teilt die Schneehärte in sechs Grade ein. Von 1 (Faust – sehr weich) bis 6 (Eis – kompakt). Die Schneefeuchtezahl für diese kalte, trockene Schneeschicht war 1 (kein Wasseranteil). Die Schneefeuchtigkeit wird in fünf Grade von 1 (trocken) bis 5 (sehr nass) eingeteilt.

Unter der abgegangenen Schicht war eine 5 cm dicke Schicht aus gefrorenen Schmelzformen und Schmelz-Gefrier-Konglomeraten mit einer Korngröße von 1 mm. Diese Schicht diente als Schwachschicht.

Die darunter liegenden Schichten blieben stabil. Die Gleitoberfläche der Schwachschicht bildete eine weniger als 10 cm dicke Eiskruste und direkt darunter eine Schicht abgerundeter Körner kleiner als 0,5 mm und mit einer Dichte von 390 kg/m<sup>3</sup>.

Durch den Vergleich der beiden Scans (vor und nach der Auslösung) konnten die, die Lawine betreffende Fläche, das Volumen und die Anrisshöhen der Anbruchzonen im GIS ausgewertet und in Tabelle 4 zusammengefasst werden.

	Old	Revised	Change
Starting volumes (both zones; $V_s$ ):	125 m <sup>3</sup>	142 m <sup>3</sup>	+ 17 (+ 14%)
Volume loss in starting zone 1:	83 m <sup>3</sup>	93 m <sup>3</sup>	+ 10 (+ 12%)
Volume of starting zone 2:	42 m <sup>3</sup>	49 m <sup>3</sup>	+ 7 (+ 17%)
Net volume deposited in run-out ( $V_d$ ):	195 m <sup>3</sup>	227 m <sup>3</sup>	+ 32 (+ 16%)
Ratio $V_d:V_s$ :	1.56:1	1.60:1	+ 0.04 (+ 3%)
Net volume entrained in track ( $V_{ent}$ ):	300 m <sup>3</sup>	283 m <sup>3</sup>	- 17 (- 6%)
Ratio ( $V_d$ ):( $V_s + V_{ent}$ ):	1:2.18	1:1.87	+ 0.076 (+ 17%)
Area of starting zone 1:	500 m <sup>2</sup>	650 m <sup>2</sup>	+ 150 (+ 30%)
Area of starting zone 2:	495 m <sup>2</sup>	540 m <sup>2</sup>	+ 45 (+ 9%)
Area of track zone:	2650 m <sup>2</sup>	2870 m <sup>2</sup>	+ 220 (+ 8%)
Area of deposit:	3000 m <sup>2</sup>	2715 m <sup>2</sup>	- 285 (- 10%)
Max. fracture height starting zone 1 <sup>a</sup> :	0.4–0.5 m	0.4–0.5 m	0
Avg. fracture height starting zone 1 <sup>a</sup> :	0.17 m	0.14 m	- 0.03 m (- 18%)
Max. fracture height starting zone 2 <sup>a</sup> :	0.3–0.4 m	0.25–0.35 m	- 0.05 m (+ 9%)
Avg. fracture height starting zone 2 <sup>a</sup> :	0.08 m	0.09 m	+ 0.01 m (+ 13%)
Path length:	370 m	375 m	+ 5 m (+ 1%)
Max. width of track:	11 m	13 m	+ 2 m (+ 8%)
Max. width of deposit:	26 m	27 m	+ 1 m (+ 4%)
Length of deposit <sup>b</sup> :	157 m	158 m	+ 1 m (+ 1%)

<sup>a</sup> Calculated (volume:area).

<sup>b</sup> Measured in GIS.

Tabelle 4: Gemessene Lawinenparameter; die Spalte "old" wurde in dem Artikel für die ISSW 2013 veröffentlicht, "revised" sind die aktuellen, überarbeiteten Ergebnisse (Prokop, et al., 2014)

Die zwei Anbruchzonen hatten ein Gesamtvolumen von annähernd 142 m<sup>3</sup>. Wie in Abbildung 23 gezeigt, war die obere Anbruchzone eine komplexe Gruppe von

vier zusammenlaufenden Auslösezonen. Daraus entstanden anfangs vier unterschiedliche Flüsse, die nach ein paar Sekunden im Hauptlawinenstrich zu einer großen Lawine zusammenflossen. Die Auslösung der zweiten Scholle in der weiter unten liegenden Anbruchzone passierte ein paar Sekunden später. Die Lawine erreicht eine Maximalgeschwindigkeit von 23 m/s im Übergangsbereich zur Ablagerungszone am Ende des Lawinenstrichs. (Pulfer, et al., 2013)

Das Mitreißen des Schnees bezieht sich auf den Abtrag und die Mobilisierung von Schnee in der Gleitbahn und einer daraus folgenden Massenzunahme im Ablagerungsbereich, verglichen mit der in der Anbruchzone ausgelösten Schneemenge. (Eglit, et al., 2005) (Sovilla, et al., 2002) (Sovilla, et al., 2007)

In der Gleitbahn der Testlawine war die Menge des verfrachteten Schnees 283 m<sup>3</sup>. In der Auslaufzone der Lawine wurden 227 m<sup>3</sup> Schnee abgelagert. Die Lawine war relativ klein und eine deutliche Ausbildung eines Lawinenkegels blieb aus. Aus den aufgenommenen Daten geht hervor, dass die maximale Anbruchhöhe der oberen Zone 40 – 50 cm und die maximale Anbruchhöhe der unteren Zone 25 – 35 cm betrug. Die mittleren Anbruchhöhen waren 14 cm bei der oberen und 9 cm bei der unteren Anbruchzone.

In Tabelle 5 sieht man die gewonnenen Daten, die notwendig sind, um dynamische Lawinenmodelle zu validieren. Es werden Lawinenbreite und Hangneigung in Abhängigkeit zur horizontalen Ausbreitungslänge [X] gezeigt. Die Hangneigung wurde in Fünfmeterschritten entlang der horizontalen Ausbreitungslänge [X] über den Höhenunterschied ermittelt. Die Ergebnisse passen gut zu den Daten von Sovilla et al., 2010 in denen festgestellt wurde, dass die Ablagerungshöhe ab einer Hangneigung von 28° und steiler abnimmt bzw sehr gering (weniger als 20 cm) ist.

Anhand der Messdaten der Totalstation (in Abbildung 25) war die Ablagerungszone vom unteren Ende bis zur Grenze zwischen Gleitbahn und Ablagerungsbereich 157 m lang und maß an der breitesten Stelle 27 m. Diese Zahlen stimmen mit den Daten des terrestrischen Laserscanners überein.

Avalanche width and slope depending on X (m).

X [m]	Avalanche width [m]	Slope [°]	
0	15.6	40.7	Anbruch
10	28.4	44.4	
20	21.7	45.1	
30	20.4	46.6	
40	16.5	41.2	
50	11	38.8	Gleithahn
60	10.5	36.6	
70	10.6	35.6	
80	10.4	35.8	
90	10.5	33.6	
100	10.2	33.6	
110	11.7	35.3	
120	10.8	37.1	
130	12.2	37.1	
140	12.2	36.6	
150	11.8	36.6	
160	11.6	36.4	
170	12.6	35.9	
180	12.0	35.7	
190	11.9	36.1	
200	13.5	35.3	
210	15.5	34.7	
220	20	28.8	Ablagerung
230	21.8	34.0	
240	23.6	31.2	
250	24.9	29.6	
260	25.8	29.6	
270	26.4	30.2	
280	27	30.5	
290	26.6	30.6	
300	25.8	30.7	
310	20.7	31.1	
320	16.3	30.6	
330	11.9	29.9	
340	11.5	28.9	
350	9.8	27.9	
360	6.6	27.3	
370	0	27.6	

Tabelle 5: Lawinenbreite und Hangneigung an der jeweiligen Stelle X [m] (Prokop, et al., 2014)

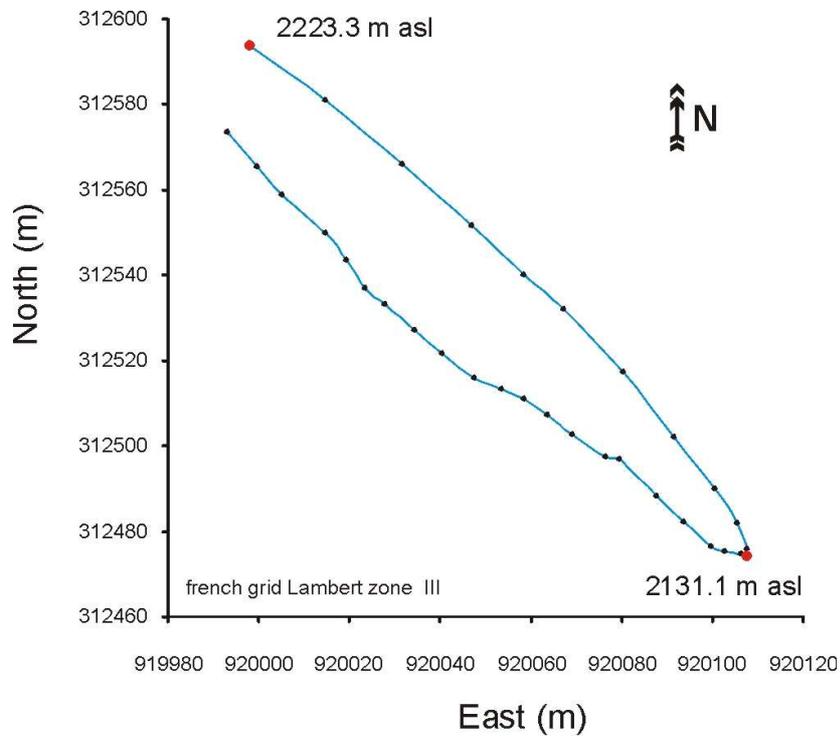


Abbildung 25: horizontale Karte der Ablagerungen mittels Totalstation aufgenommen. (Prokop, et al., 2013)

Auch die unterschiedlich erhobenen Volumina der Ablagerung lagen nahe beieinander. Die durch die Totalstation aufgenommene horizontal projizierte Fläche betrug 2900 m<sup>2</sup> und die TLS – Daten ergaben eine Fläche von 3040 m<sup>2</sup>. In Abbildung 26 ist die Übereinstimmung der beiden separat erhaltenen Datensätze sehr gut zu erkennen.

Das kombinierte Volumen des ausgelösten Schnees in der Anbruchzone und des mitgerissenen Schnees in der Gleitbahn war größer als das Volumen des Schnees in der Ablagerungszone. Dieser Volumensunterschied ist einerseits durch das Verdichten bei der Ablagerung und andererseits durch die Beeinträchtigung der Schneedecke (teilweise wird diese eingedrückt bzw bleibt wiederum auch Schnee der Lawine hängen) entlang der Gleitbahn zu erklären. In der Ablagerungszone wurde eine Schneedichte von durchschnittlich 380 kg/m<sup>3</sup> gemessen. Im Vergleich dazu sei noch einmal die Dichte von 250 kg/m<sup>3</sup> in dem Anbruchgebiet erwähnt, wodurch sich ein Dichteverhältniswert von 1,52 für diese Lawine ergibt. Das ist kein besonders hoher Wert, da die Schneedichte in der Anbruchzone bereits verhältnismäßig hoch war.

In unserem Fall hatte der ausgelöste Schnee ein kombiniertes Volumen von 142 m<sup>3</sup> und der abgelagerte Schnee ein solches von 227 m<sup>3</sup>. Zusätzlich wurde ein Volumen von 283 m<sup>3</sup> Schnee in der Gleitbahn mobilisiert. Berücksichtigt man all das, ergibt sich ein Volumenverhältnis von 1: 1,87.

Sovilla (2004) führte einen Zuwachsindex  $I_g$  ein, der als  $M_d/M_r$  definiert ist.

$$I_g = \frac{M_d}{M_r} \quad (2)$$

Dabei ist  $M_d$  die Masse der Ablagerung und  $M_r$  die ausgelöste abgegangene Masse. Verwendet man die mittleren Schneedichten von 250 kg/m<sup>3</sup> für die Anbruch- und 380 kg/m<sup>3</sup> für die Ablagerungszone erhält man 86260 kg für  $M_d$  und 35500 kg für  $M_r$ . Das ergibt für diese Lawine einen Massenzuwachsindex von 2,4. Der errechnete Netto-Schneemassenverlust war 86260 kg – 35500 kg = 50760 kg. Sovilla (2004) beobachtete in ihrer Studie auf dem Monte Pizzac Testgelände  $I_g$ -Verhältnisse von 1,8 bis 8,8.

Trotz der Unterschiede der spezifischen Orte und der Lawinencharakteristika zeigen ihre und die Ergebnisse unseres Projekts, dass auch bei relativ kleinen Lawinen eine signifikante Menge Schnee in der Gleitbahn mobilisiert werden kann. Das bedeutet, dass die Mobilisierung von Schneemassen unabhängig von der Lawinengröße ist.

Die Front der Lawine wurde mittels Zeitraffer-Kameraaufnahmen für mehrere Zeitschritte rekonstruiert. In Abbildung 26 sieht man die Lawinenfront zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die roten Punkte markieren die Lawinenfront bei geraden Sekundenzeitpunkten ( $t = 2 \text{ s}, \dots t = 16 \text{ s}$ ) und die schwarzen Punkten markieren den Startzeitpunkt und ungerade ( $t = 3 \text{ s}, \dots t = 15 \text{ s}$ ) Zeitpunkte, beginnend bei  $t = 3 \text{ s}$ . Die violetten Punkte verdeutlichen die Lawinenfront nach 26 s. Grüne Punkte stellen die Ablagerung bei  $t = 34 \text{ s}$  dar und zeigen auch einen zweiten, etwas verzögerten Fluss. Es muss beachtet werden, dass für den Zeitpunkt  $t = 1 \text{ s}$  keine Daten vorliegen, da die Zeitrafferkamera in Bezug auf Datenaufnahme, -verarbeitung und -speicherung bei so kurzen Zeitspannen limitiert ist. Die vorliegenden Daten erlauben eine Messung der Frontgeschwindigkeit der Lawine. Die Lawine erreichte bei unseren Messungen eine Maximalgeschwindigkeit von 23 m/s am Ende der Gleitbahn, übergehend in die Ablagerungszone (Pulfer, et al., 2013). Dieser Bereich ist in Abbildung 26 mit einer blau strichlierten Linie markiert, welche mit dem Zeitpunkt  $t = 16 \text{ s}$  zusammenfällt. Die Positionen der Lawinenfront, welche durch die Zeitrafferkamera aufgenommen wurden, passen sehr gut zu der Gleitbahn, welche durch die Auswertung der zwei Laserscans ausgewiesen wurde. Für die Lawinenfront bei dem zweiten, etwas weiter unten liegenden Anbruchgebiet gibt es keine Zeitrafferaufnahmen.

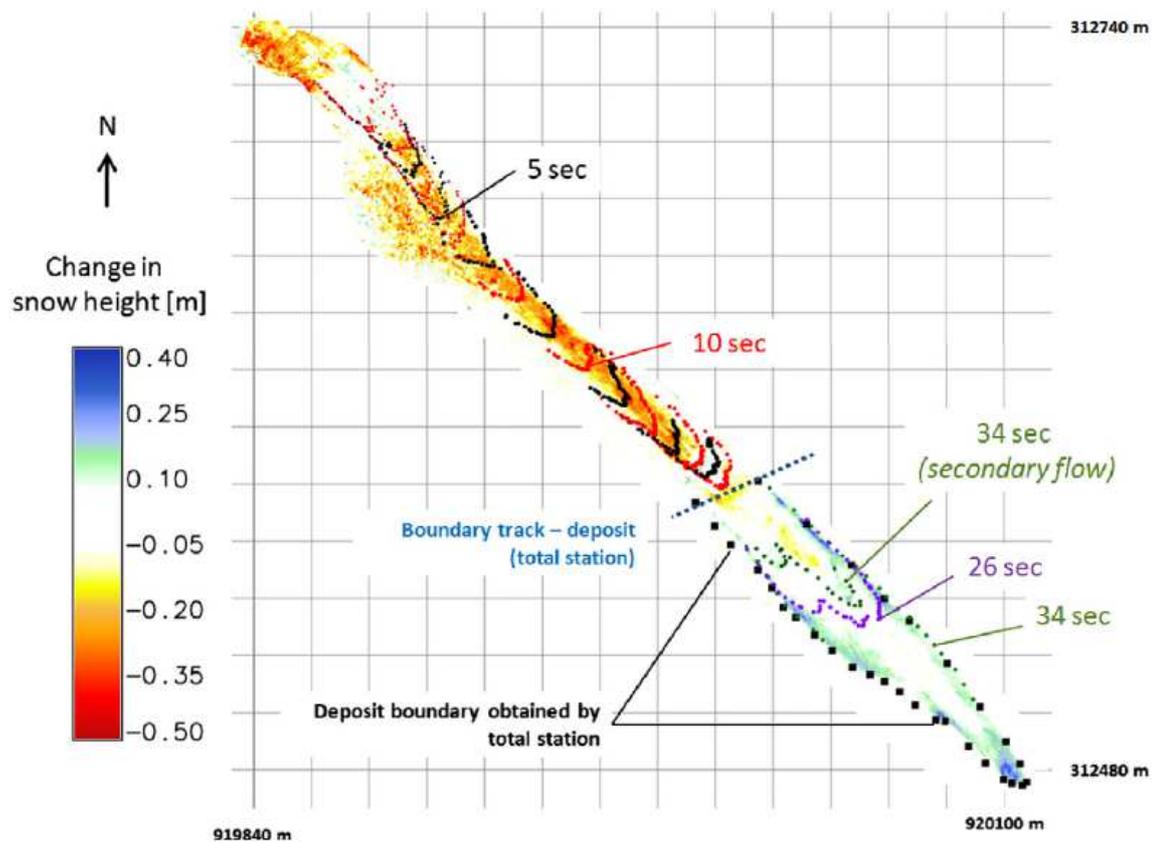


Abbildung 26: Ablagerungsgrenzen und Frontpositionen der Lawinen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die schwarzen, roten, violetten und grünen Punkte zeigen die Position der Lawine zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die schwarzen Vierecke markieren die mittels Totalstation erhobenen Ablagerungsgrenzen. (Prokop, et al., 2014)

## 5.2. Diskussion des Projekts vom Col du Lautaret

Es wurde eine künstlich ausgelöste Lawine am Col du Lautaret Testgelände mit einem terrestrischen Laserscanner vermessen und dadurch wurden für dynamische Lawinenmodelle wichtige Lawinenparameter erhoben. Die gewonnenen Daten enthalten Informationen über Fläche und Volumina der ausgelösten Schneeschichten in den Anbruchzonen sowie die Höhen der Anbruchkanten, das Volumen des mobilisierten Schnees der Gleitbahn und auch das Volumen des abgelagerten Schnees. Es konnten zwei Anbruchgebiete / -zonen bestimmt und ein Volumensverhältnis von 1: 1,87 zwischen ausgelöstem und abgelagertem Schnee festgestellt werden, welches aus der Verdichtung während der Erosion in der Gleitbahn und der Ablagerung in der Ablagerungszone resultiert.

Der Zuwachsindex der Lawine betrug 2,4. Die TLS – Daten der Länge und Breite der Lawine und der Fläche der Ablagerung passen gut mit den mittels Totalstation aufgenommenen Daten zusammen und die resultierenden Volumina und Dichteverhältnisse stimmen mit den im Feld aufgenommenen Dichtemessungen überein.

Die mit dem terrestrischen Laserscanner gewonnenen Daten können daher zur Plausibilitätsprüfung von dynamischen Lawinenmodellen herangezogen werden. Unterschiedliche Eigenschaften von Lawinen, bedingt durch verschiedene Topographie und Schneeeigenschaften, machen solche Vermessungen essentiell für Modellevaluierungen. Die Ergebnisse unseres Projekts unterstreichen vor allem auch die Tauglichkeit von terrestrischen Laserscannern zur Vermessung von Schneeoberflächen, um Beobachtungen und Vermessungen vieler anderer Studien zu unterstützen oder zu verbessern. Die vom TLS gelieferten Daten sind nicht nur genau, sondern können zudem auch relativ schnell und ohne große Schwierigkeiten und Gefahren aufgenommen werden.

### 5.3. Ergebnisse des Projekts am Feistritzbach

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Laserscans aller Teilabschnitte des Feistritzbaches bis zur Drau genauer beschrieben.

#### 5.3.1. Scanabschnitt 1

Der erste Scanabschnitt erstreckte sich über den hinteren, also bachaufwärts gelegenen Teil des Retentionsbeckens der alten bzw neuen Sperre. Hier wurde vor dem Umbau eine Referenzmessung getätigt, um einen „Startwert“ für die Geschiebemassenbilanz zu erhalten.

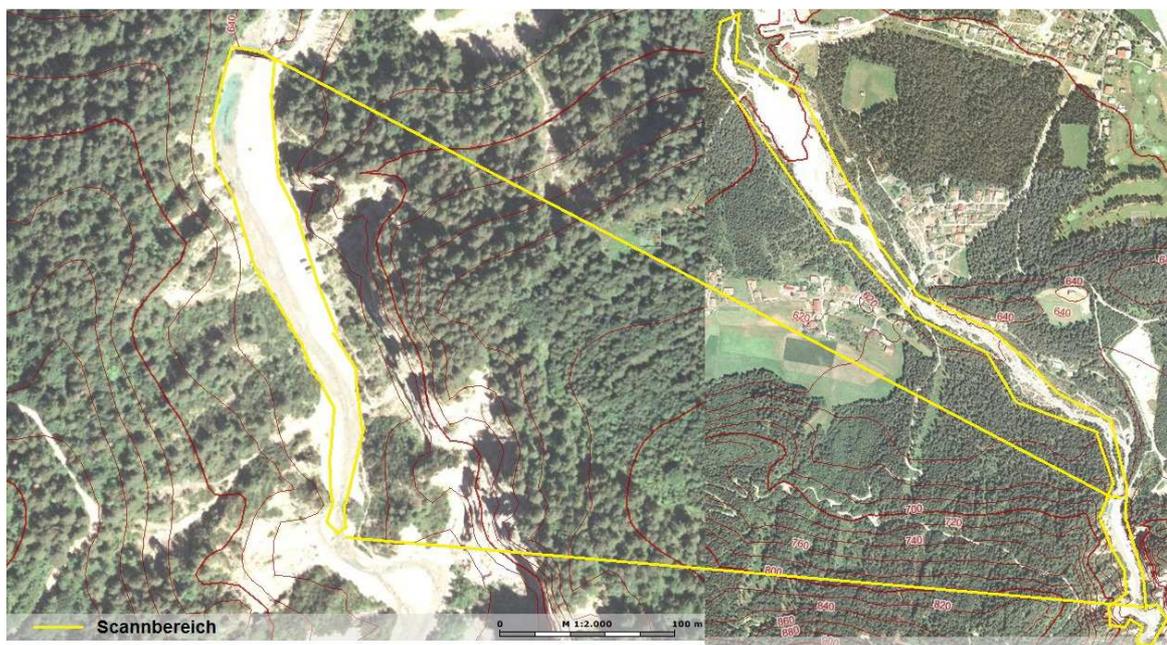


Abbildung 27: Scanbereich oberhalb der neu gebauten Sperre (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 28: Panoramabilder des Scanbereichs aus unterschiedlichen Perspektiven (bläulich eingefärbt 2011, normal gefärbt 2008) (Prokop, et al., 2011)

Die Auswertung der Überwachungsperioden lieferten folgende Ergebnisse:

Geschiebebilanz:		
Zeitraum	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
27.10.2008-31.05.2011	-27356	9495

Tabelle 6: Geschiebebilanz des ersten Scanabschnitts im Zeitraum 27.10.2008 – 31.05.2011 (Prokop, et al., 2011)

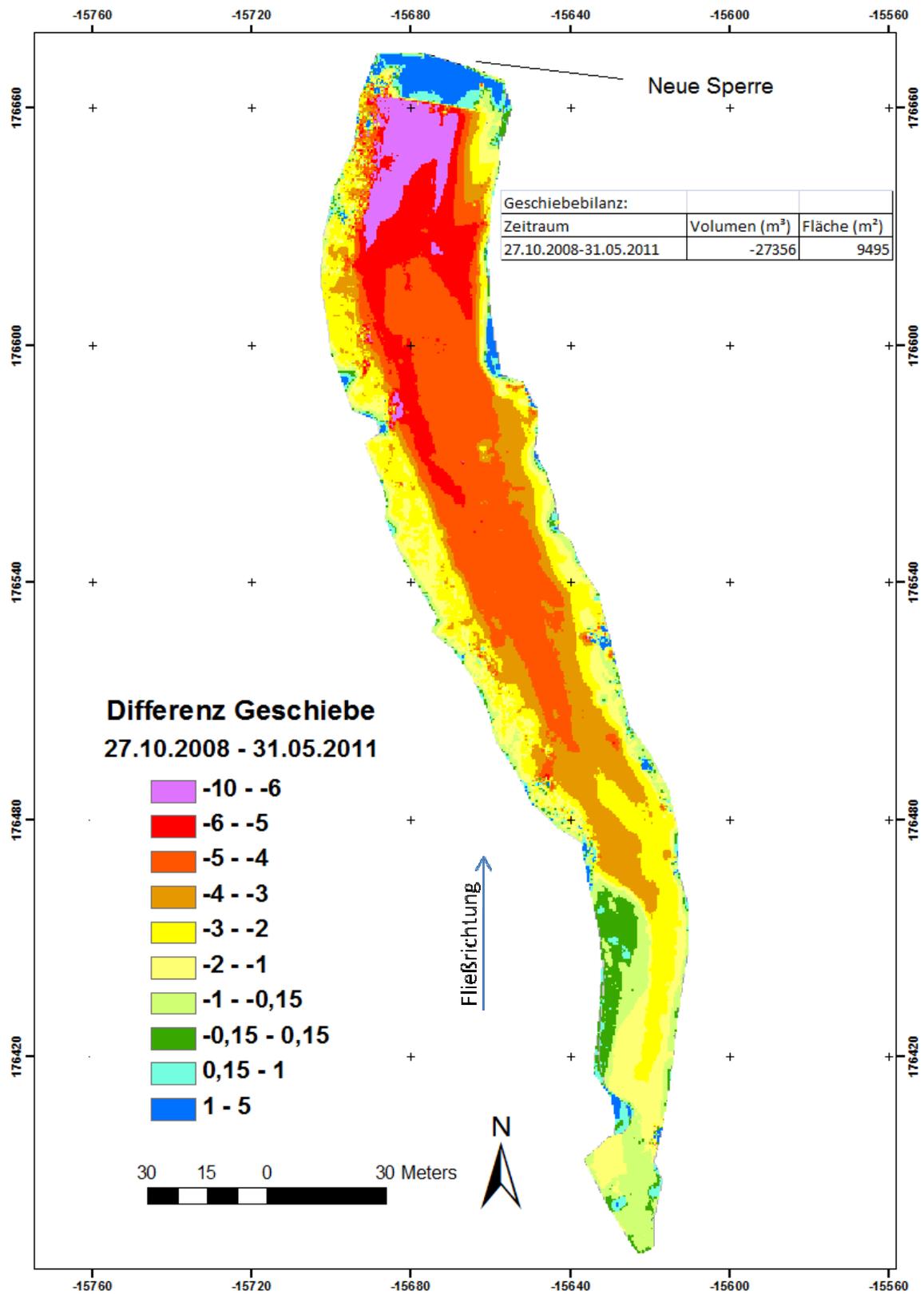


Abbildung 29: Geschiebebilanzkarte 27.10.2008 - 31.05.2011 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

Der Unterschied des in Tabelle 6 angeführten Geschiebeverlusts zum Gesamtgeschiebeverlust erklärt sich durch die unterschiedlichen Berechnungsflächen der Scanpositionen und die Fehler bei Scanregistrierung und Interpolationsverfahren. (Prokop, et al., 2011)

Geschiebebilanz:		
Zeitraum	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
27.10.2008-16.11.2009	-2683	7000
16.11.2009-13.04.2010	-8296	7860
13.04.2010-25.11.2010	-9199	7860
25.11.2010-31.05.2011	-3316	7860
<b>Gesamt</b>	<b>-23494</b>	

Tabelle 7: Gesamte Geschiebebilanz des ersten Scanabschnitts vom 27.10.2008 - 31.05.2011 (Prokop, et al., 2011)

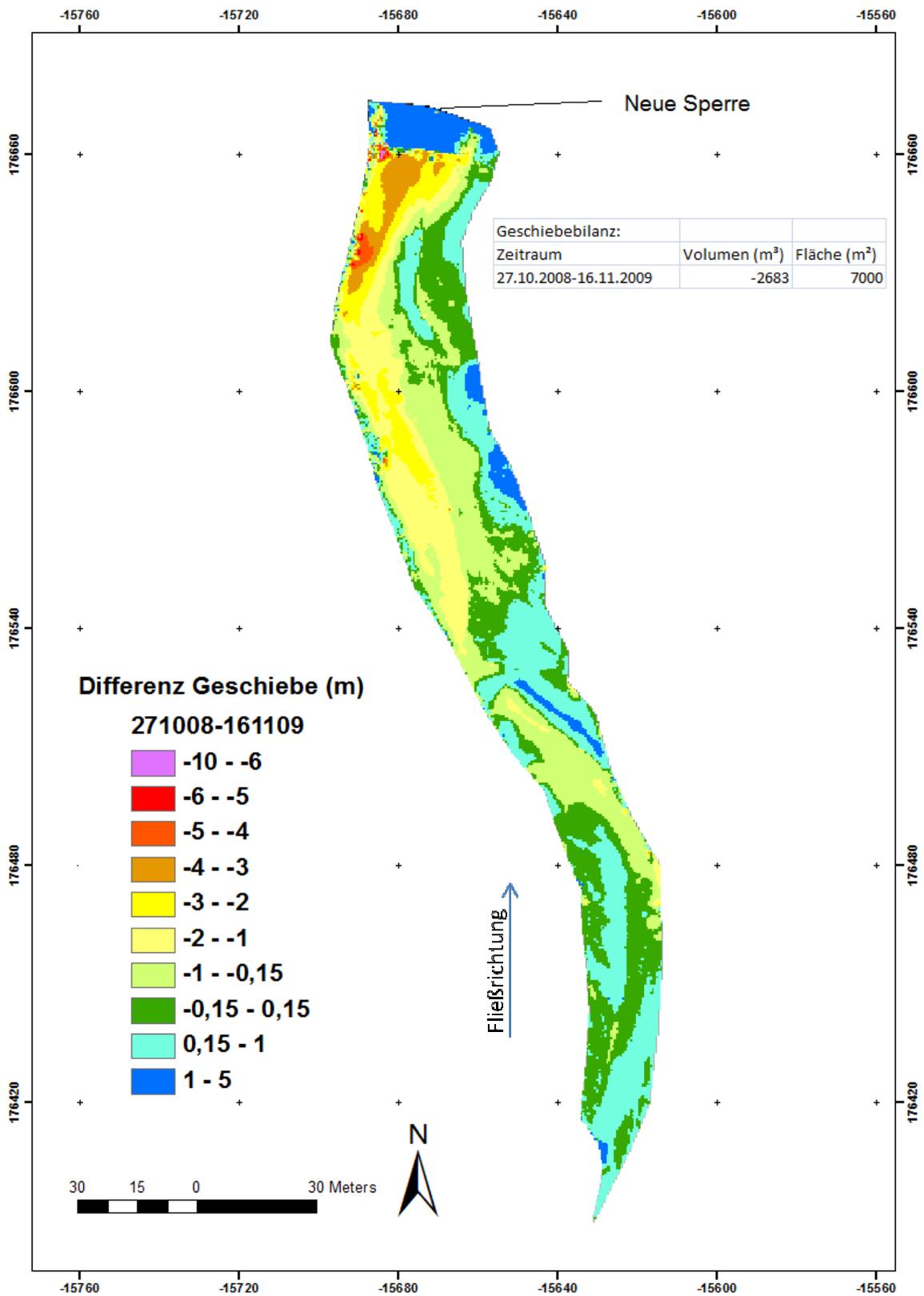


Abbildung 30: Geschiebebilanzkarte 27.10.2008 - 16.11.2009 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

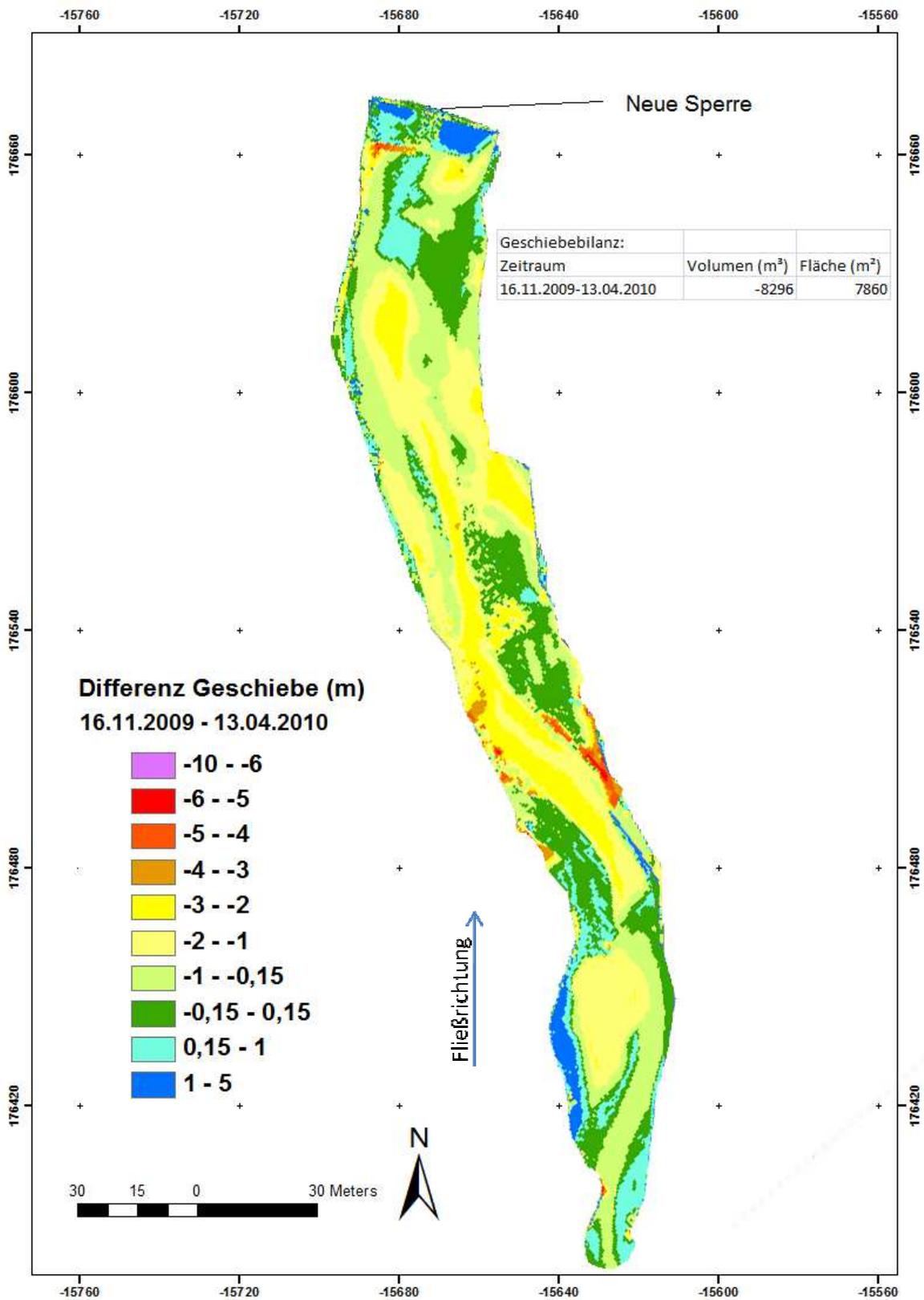


Abbildung 31: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 - 13.04.2010 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

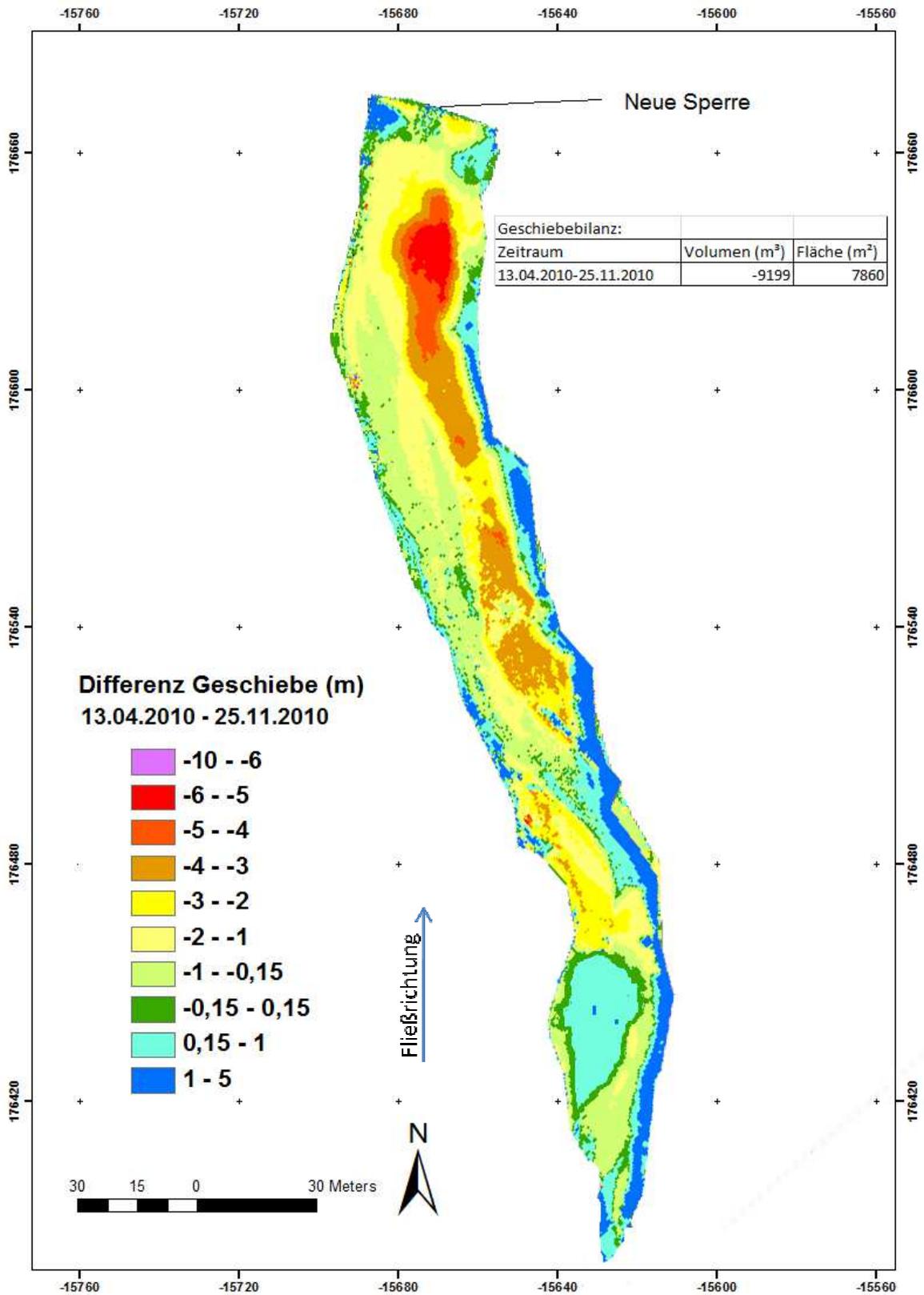


Abbildung 32: Geschiebebilanzkarte 13.04.2010 - 25.11.2010 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

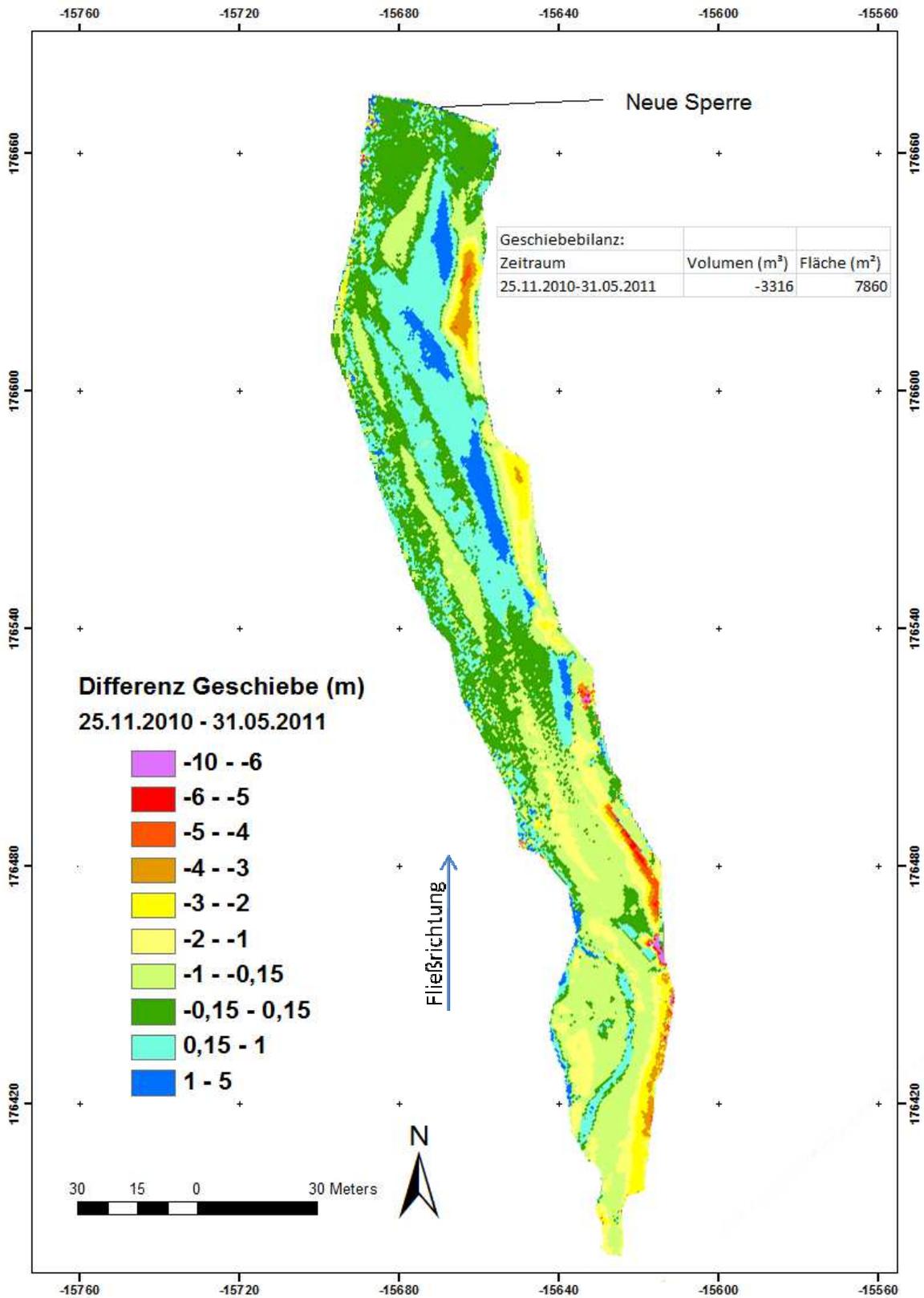


Abbildung 33: Geschiebebilanzkarte 25.11.2010 - 31.05.2011 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

### 5.3.2. Scanabschnitt 2

Die Geschiebebilanz für den obersten Scanabschnitt wird in einer kleineren Skala dargestellt, da die Umlagerungen nicht groß genug waren, um im selben Maßstab wie im vorigen Abschnitt repräsentativ zu sein (Prokop, et al., 2011).

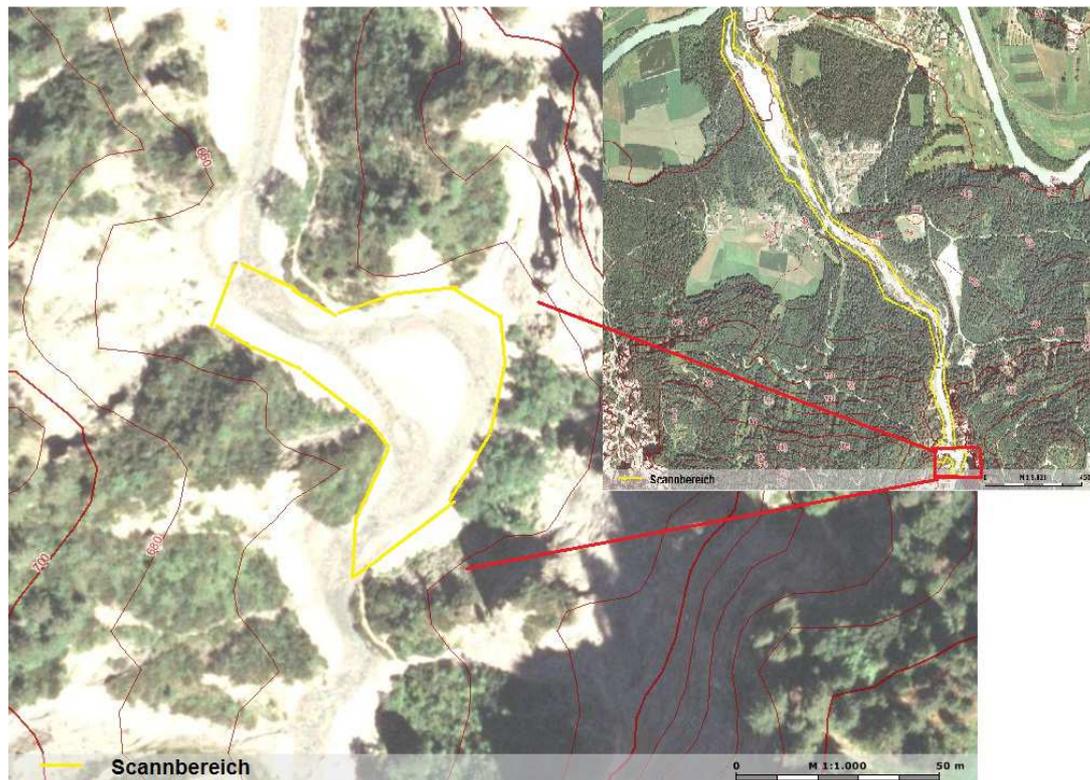


Abbildung 34: Scanabschnitt des obersten gemessenen Bereichs des Feistritzbachs (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 35: Panoramabild des obersten Scanabschnitts (Prokop, et al., 2011)

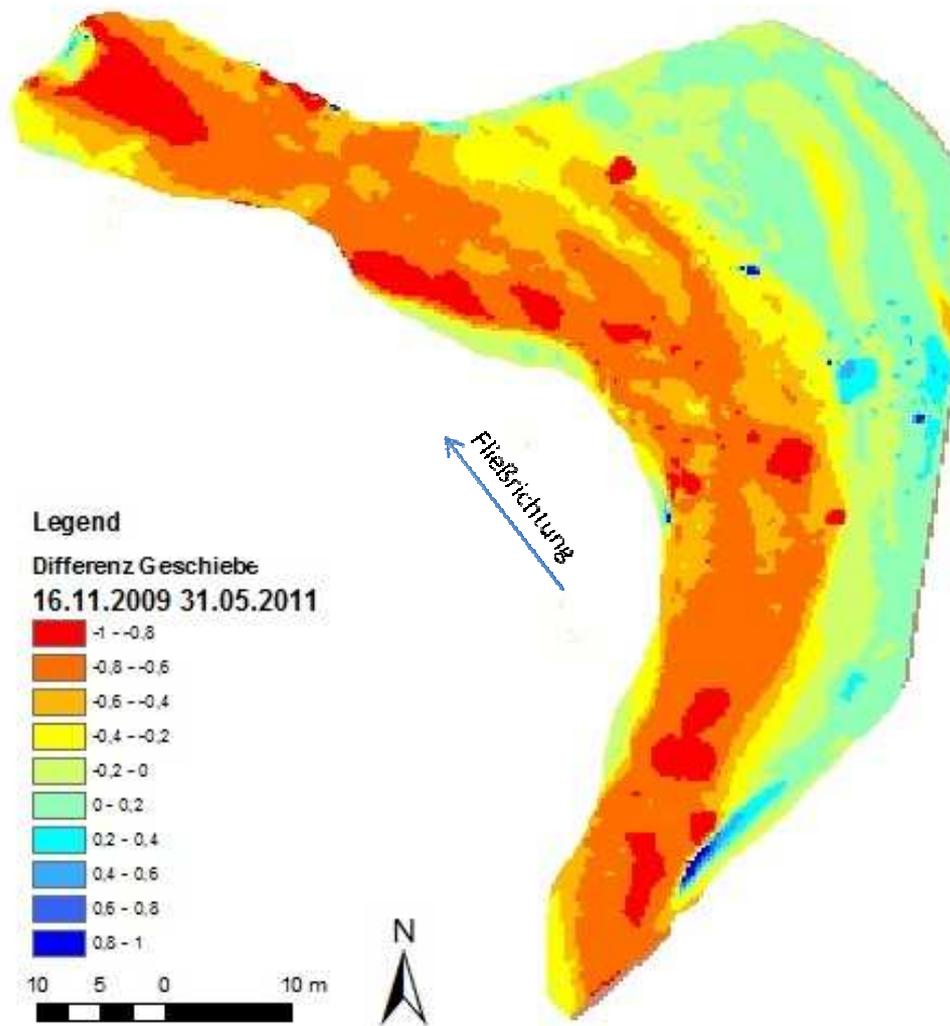


Abbildung 36: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 – 31.05.2011 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

Die Ergebnisse der errechneten Geschiebebilanz zwischen 16. November 2009 und 30. Mai 2011 zeigen, dass auf 1.987 m<sup>2</sup> Fläche 944 m<sup>3</sup> Geschiebe abgetragen wurde. In dieser Periode waren auch die stärksten Veränderungen von Geschiebeablagerungen zu verzeichnen. Vor dem Bau der Schlitzsperre (27. Oktober 2008 bis 16. November 2009) konnte schon eine Eintiefung des Gerinnes gemessen werden. Im Zeitraum zwischen 26. November 2010 und 30. Mai 2011 gab es nur mehr sehr wenige Veränderungen bzw Umlagerungen. (Prokop, et al., 2011)

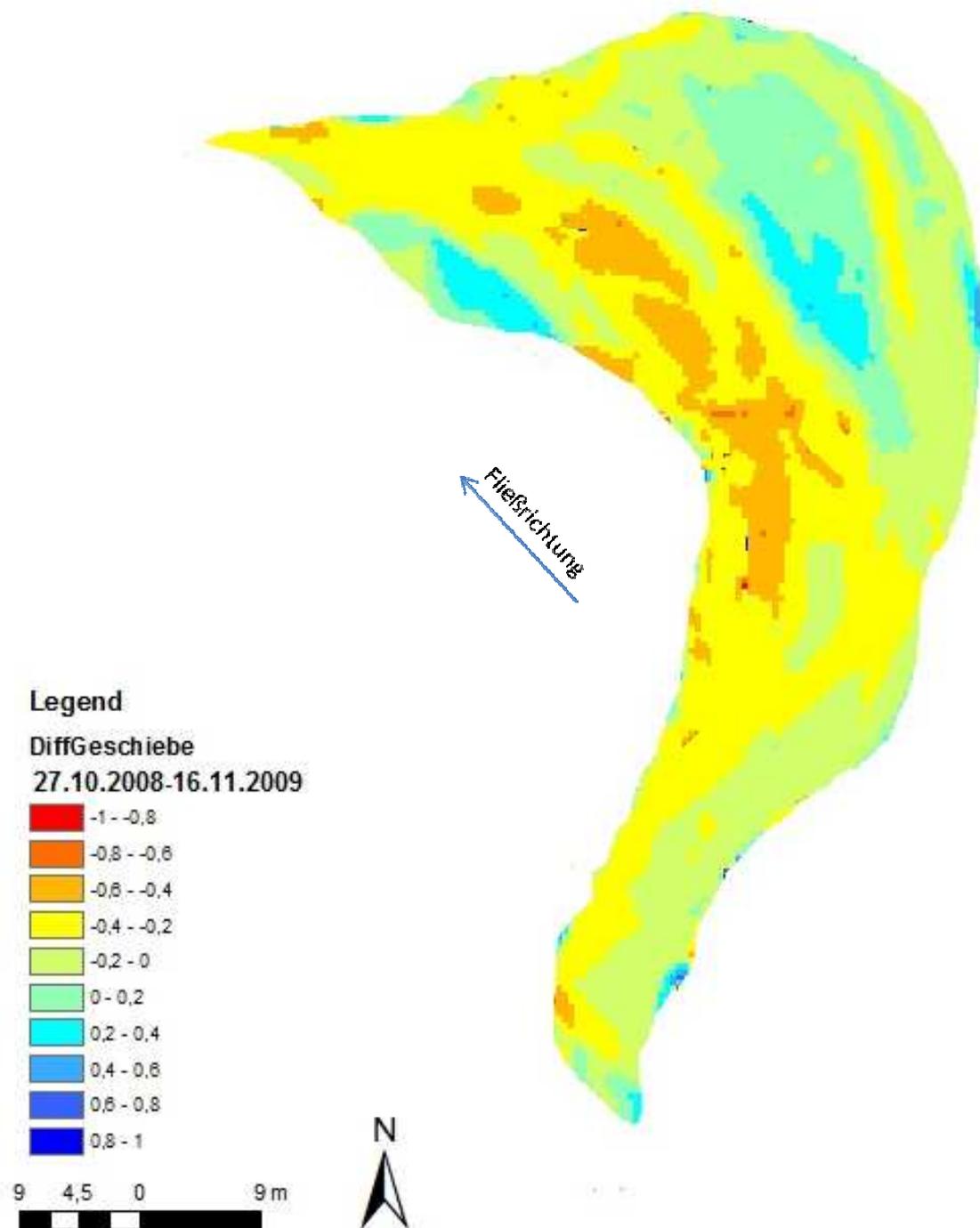


Abbildung 37: Geschiebebilanzkarte 27.10.2008 - 16.11.2009 des Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

Damit kann die Frage, wie viel Geschiebe oberhalb der Schlitzsperre erodiert wurde, beantwortet werden. Es wurden vom Zeitpunkt des Schlitzsperrenbaus im

November 2009 bis Ende Mai 2011 insgesamt ca 28.000 m<sup>3</sup> transportiertes Geschiebe registriert. (Prokop, et al., 2011)

### 5.3.3. Scanabschnitt 3

Unmittelbar nach der Sperre konnten keine wirklich nennenswerten Unterschiede bei den Geschiebeablagerungen zwischen 2008 und 2011 erkannt werden. Diese Tatsache ist aber auch von Interesse. In Abbildung 40 erkennt man gut, dass das 2008 flussaufwärts der Sperre erodierte Material 2009 unterhalb abgelagert wurde, dann aber im Zeitraum bis 2011 vollständig in die unteren Bereiche des Feistrizbaches oder in die Drau transportiert wurde. (Prokop, et al., 2011)

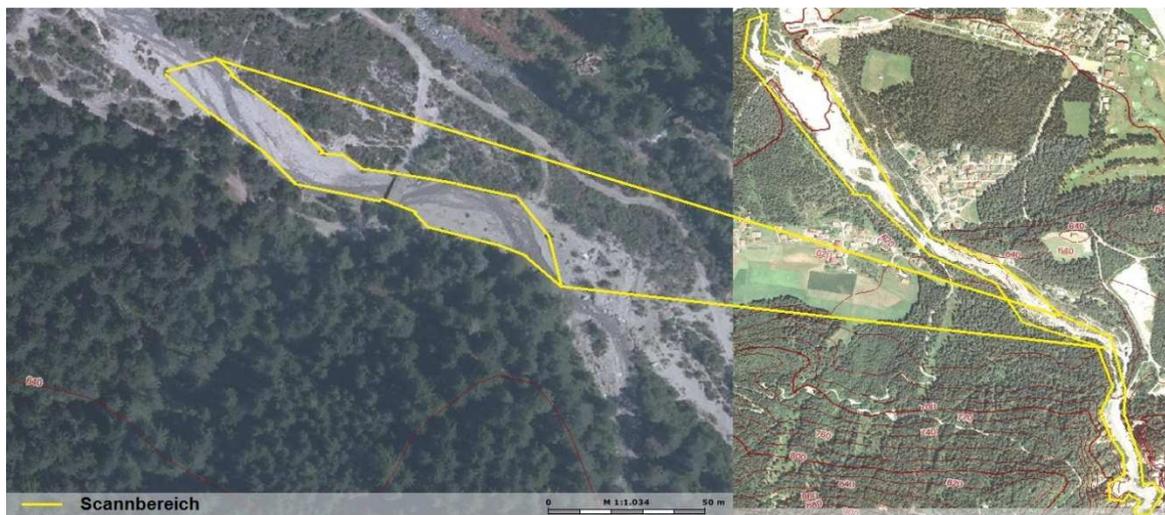


Abbildung 38: Scanabschnitt 3 - unterhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 39: Panoramabild des Scanabschnitts 3 (Prokop, et al., 2011)

In diesem Abschnitt wurden im Zeitraum von 2008 bis 2009 1200 m<sup>3</sup> abgelagert, das entspricht in etwa der Hälfte des Erosionsmaterials oberhalb der Sperre. Diese Ablagerungen wurden bis 2011 fast komplett erodiert. Dadurch wurde auch nachfolgendes Geschiebe über diesen Bereich hinaus transportiert. (Prokop, et al., 2011)

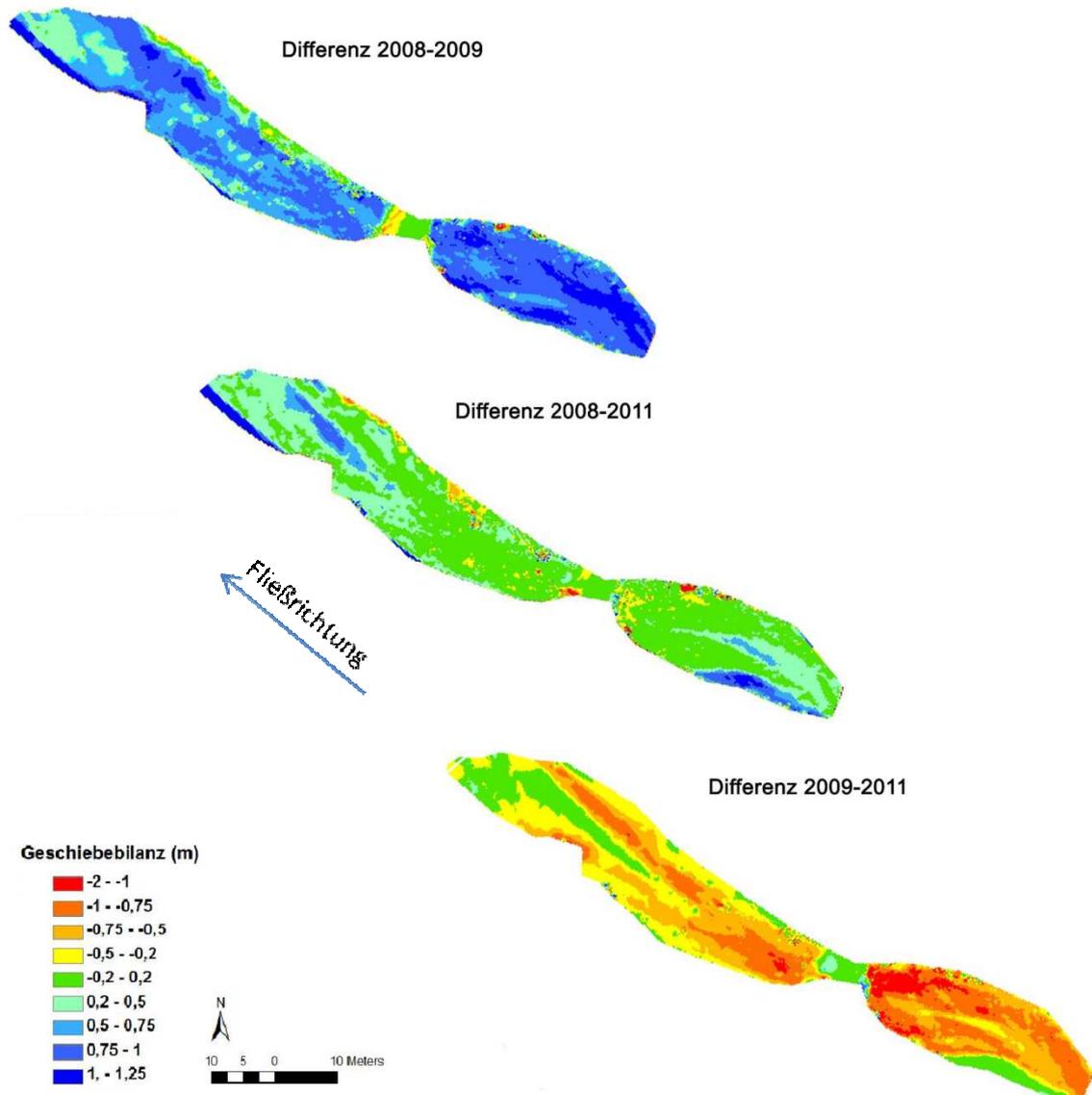


Abbildung 40: Geschiebebilanzkarten verschiedener Zeitabschnitte des Scanbereichs unterhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011)

### 5.3.4. Scanabschnitt 4

In Scanabschnitt 4 konnte festgestellt werden, dass noch 2011 Ablagerungen aus 2008/09 existierten. Diese waren also bis zum Abschlusse der Messarbeiten nicht bis in die Drau transportiert worden. (Prokop, et al., 2011)

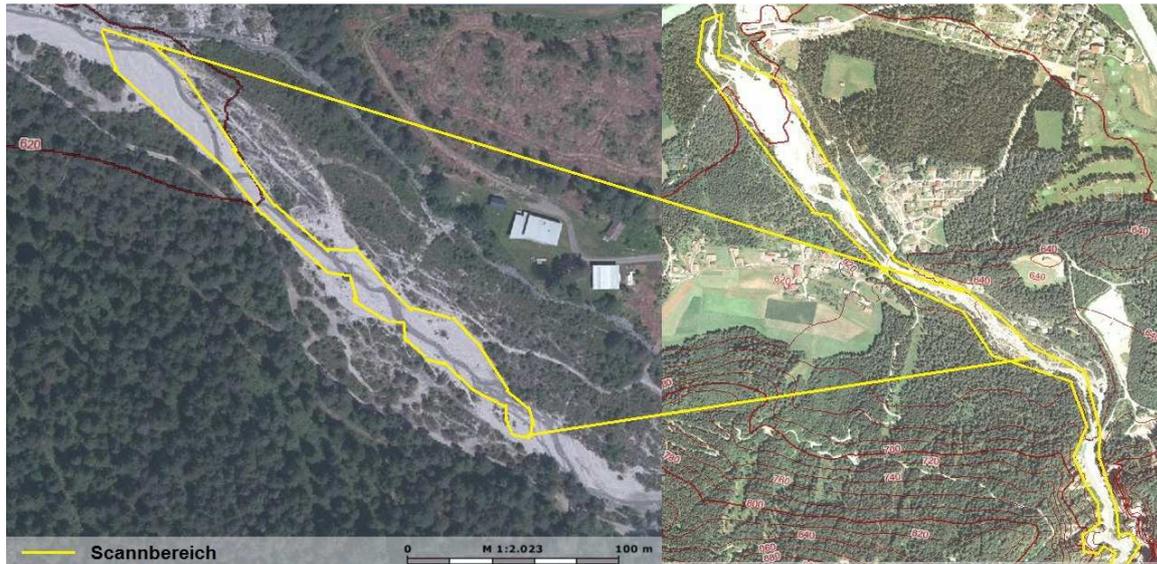


Abbildung 41: Scanabschnitt 4 (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 42: Panoramabild des Scanabschnitts 4 (Prokop, et al., 2011)

Aus der Geschiebebilanzkarte in Abbildung 43 geht hervor, dass etwa  $1667 \text{ m}^3$  Geschiebe im Zeitraum von 2009 bis 2011 hauptsächlich im unteren Bereich vor der Straßenbrücke in Feistritz auf der  $4520 \text{ m}^2$  großen Fläche abgelagert wurden. (Prokop, et al., 2011)

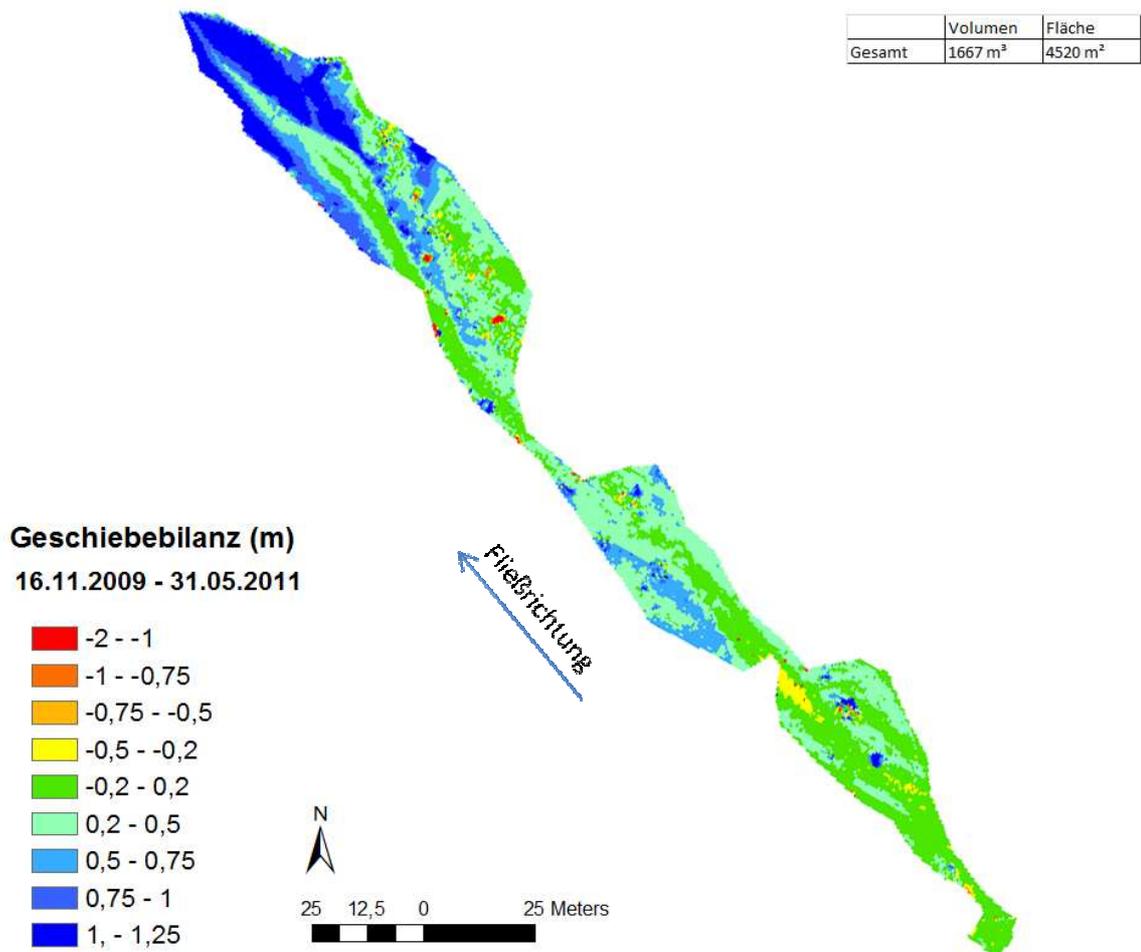


Abbildung 43: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 - 31.05.2011 des Scanabschnitts 4 (Prokop, et al., 2011)

### 5.3.5. Scanabschnitt 5

In Scanabschnitt 5 mit einer Größe von 7845 m<sup>2</sup> wurden in etwa 1621 m<sup>3</sup> abgelagertes Material gemessen, vor allem im direkt an das untere Becken von Abschnitt 4 angrenzenden Bereich, noch oberhalb der Straßenbrücke in Feistritz. Im nachfolgenden engen Bereich unterhalb der Straßenbrücke waren keine bedeutenden Ablagerungs- oder Erosionsgebiete festzustellen. (Prokop, et al., 2011)

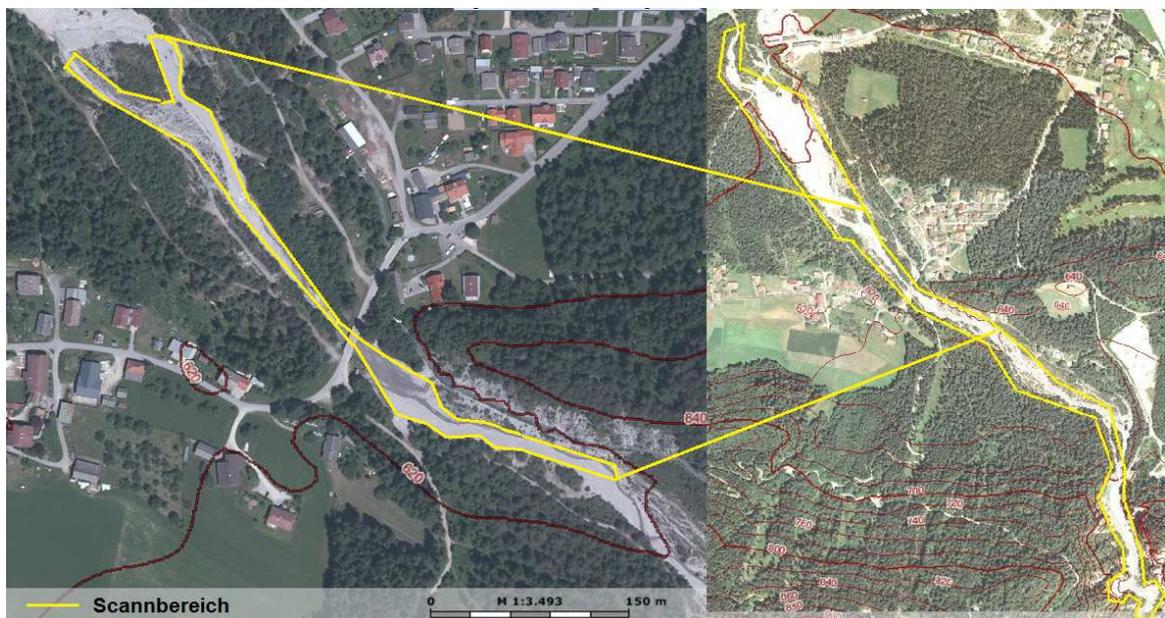


Abbildung 44: Scanabschnitt 5 (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 45: Panoramabild des Scanabschnitts 5 (Prokop, et al., 2011)

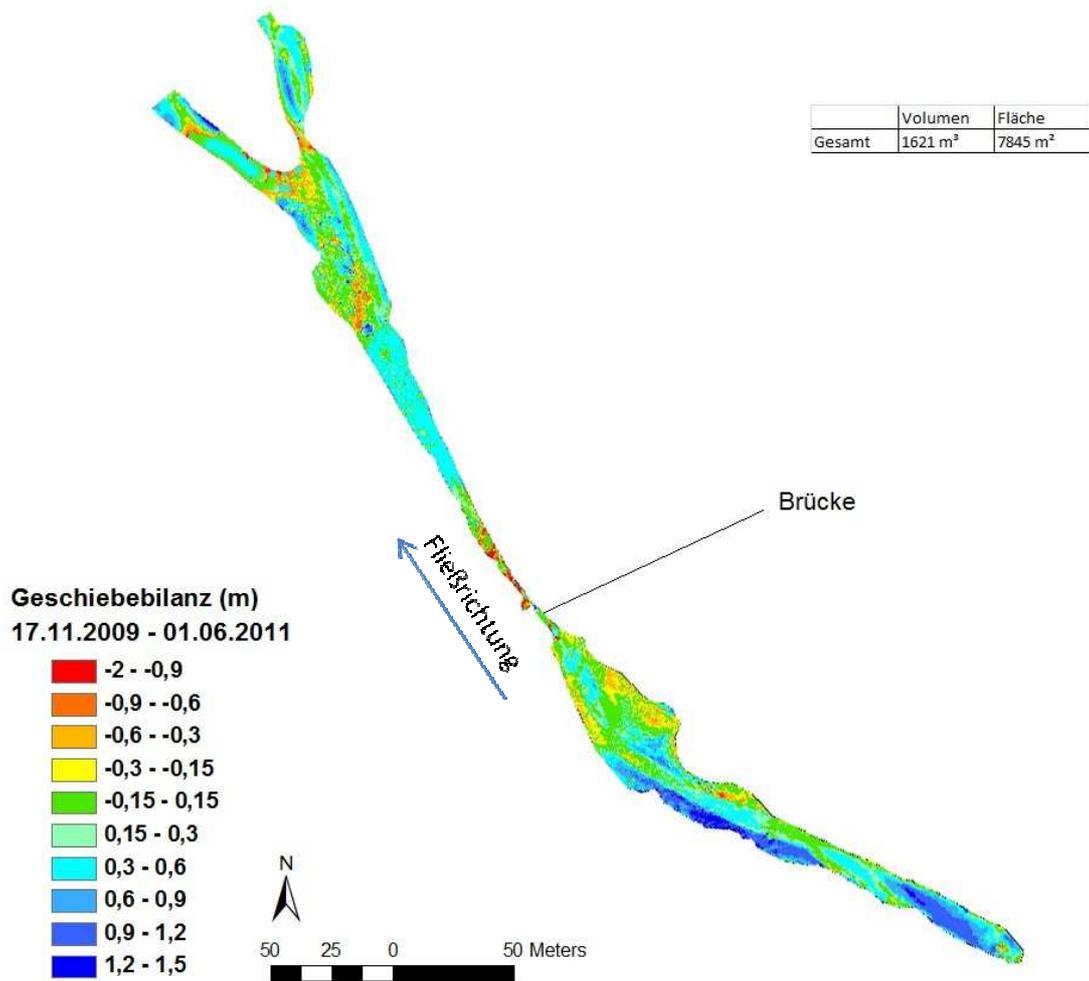


Abbildung 46: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 - 31.05.2011 des Scanabschnitts 5 (Prokop, et al., 2011)

### 5.3.6. Scanabschnitt 6

Im untersten und größten Scanabschnitt mit 29539 m<sup>2</sup> Fläche wurden die größten Geschiebeablagerungen gemessen. Zwischen dem 16. November 2009 und dem 1. Juni 2011 wurden 8568 m<sup>3</sup> Geschiebe gemessen, vor allem im oberen Bereich, in dem das Flussbett besonders flach und breit ist. Im schmäleren unteren Bereich zwischen diesem Schwemmkegel und der Drau waren hingegen sogar leichte Erosionen feststellbar. (Prokop, et al., 2011)

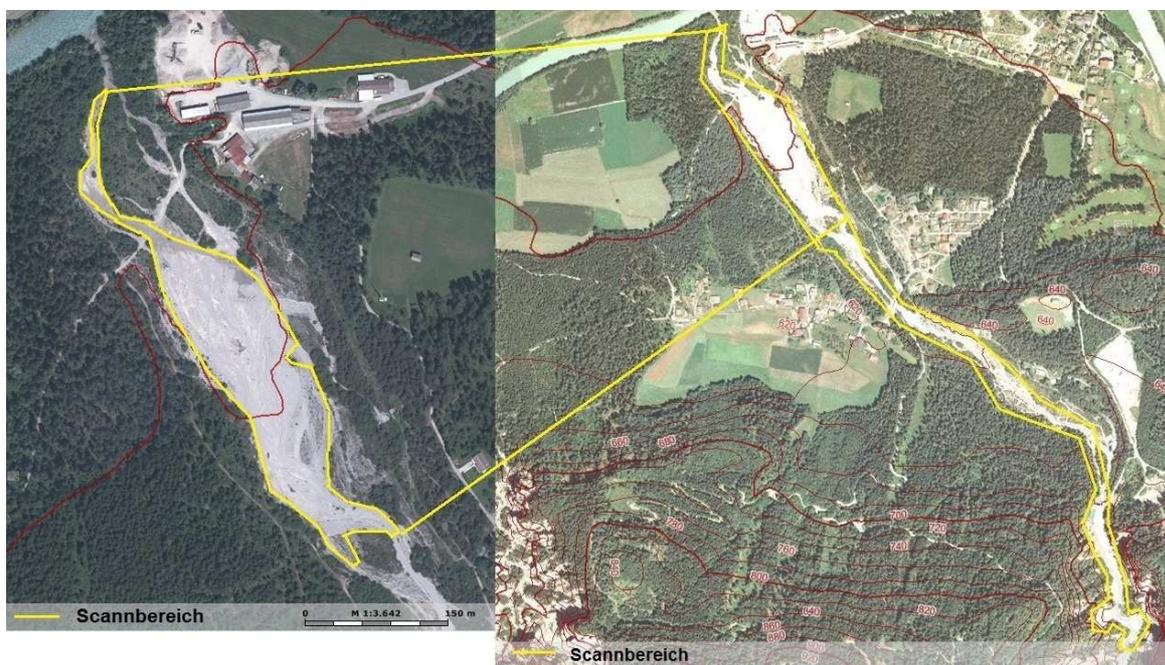


Abbildung 47: Scanabschnitt 6 (Prokop, et al., 2011)



Abbildung 48: Panoramabild des Scanabschnitts 6 (Prokop, et al., 2011)

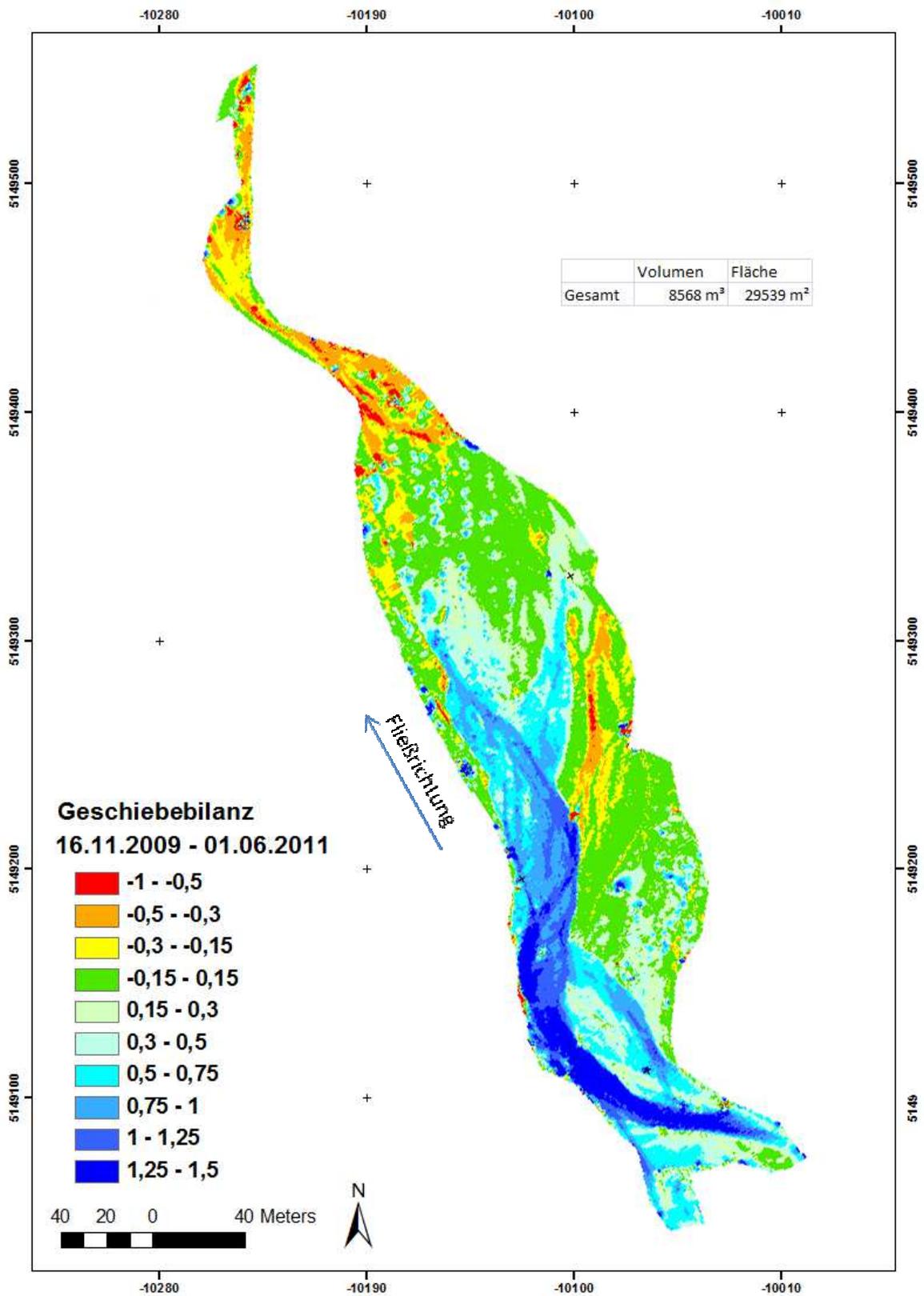


Abbildung 49: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 - 31.05.2011 des Scanabschnitts 6 - Becken des Schwemmkegels oberhalb der Mündung in die Drau (Prokop, et al., 2011)

Kumuliert kommt man auf ein Gesamtgeschiebevolumen von 11856 m<sup>3</sup>. Damit kann man die Frage nach dem am Schwemmkegel abgelagerten Geschiebe beantworten: Im Bereich zwischen Sperre und Draueinmündung liegen gerundet 12000 m<sup>3</sup> Geschiebe.

Daraus wiederum beantwortet sich die Frage nach der Geschiebemenge, die in die Drau transportiert wurde. Wenn man ausschließen kann, dass Geschiebe auf unnatürliche Weise entnommen oder außerhalb des gesannten Bereiches abgelagert wurde, sind 16000 m<sup>3</sup> Geschiebe in die Drau gelangt. (Prokop, et al., 2011)

#### **5.4. Diskussion des Projekts am Feistritzbach**

Bei dem Projekt am Feistritzbach wurde mittels der Technik des terrestrischen Laserscannens eine Geschiebemassenbilanz (Siehe Tabelle 7) erstellt. Gleichzeitig wurde im Zuge dieser Aufgabenstellung die Funktionalität der Schlitzsperre überprüft und nachgewiesen. Durch die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstellten Geländemodelle war es sehr schnell möglich, eine Aussage über erodiertes oder abgelagertes Geschiebe zu treffen.

Da man zum Berechnen der Geschiebebilanz zusätzlich den Registrierungsfehler der Scans zueinander, den atmosphärischen Fehler sowie die Fehler aus Filterung und Interpolation der Punktdaten berücksichtigen muss, konnte festgestellt werden, dass sich ein möglicher Höhenfehler von +/- 15 cm ergibt. Dieses Ergebnis bezieht sich nur auf maximale flächige Abweichungen, nicht auf Einzelpunkte, die im Filterprozess übersehen wurden. Diese können den Wert des Höhenfehlers zwar erheblich überschreiten, wirken sich auf das Ergebnis der Geschiebebilanz nicht aus, weil sie sich auf Einzelzellen beschränken.

Wird der maximale Höhenfehler auf die Fläche umgelegt, erhält man einen Fehler von +/- 150 m<sup>3</sup> pro 1000 m<sup>2</sup>. Der mittlere Fehler der Messung ist aber erheblich geringer. (Prokop, et al., 2011)

Wenn man den verhältnismäßig geringen Materialaufwand dem schnell erhaltenen, genauen Ergebnis gegenüberstellt, kann man darauf schließen, dass Laserscannen eine hervorragende und zukunftsweisende Methode im Bereich der Naturgefahrenforschung darstellt, wie in dieser Arbeit zum Erstellen von Massenbilanzen, aber auch bei vielen anderen Aufgabenstellungen.

## 6. Zusammenfassung

Aus der erfolgreichen Beantwortung der Fragestellung des Projekts am Feistritzbach geht hervor, dass sich terrestrisches Laserscanning hervorragend zur Messung von Geschiebebilanzen nutzen lässt.

Die Veränderungen im Aufnahmegebiet konnten sehr hoch auflösend gemessen werden. Die hohe Anzahl an gemessenen Punkten und deren äußerst hohe Genauigkeit werden momentan von keinem alternativen Messgerät erreicht. Außerdem ist das terrestrische Laserscanning eine sehr flexible und kostengünstige Messmethode. Durch das flächige Darstellen der Daten und das genaue Ermitteln des Erosions- und Ablagerungsverhalten konnten sämtliche Fragen beantwortet werden.

Es war das erste Mal, dass die Funktionsweise einer Schlitzsperre so hochauflösend überprüft wurde. Geschiebe wurde, wie von den Planern des Bauwerks gewünscht, mit zunehmender Dauer von immer weiter oberhalb der Sperre liegenden Geschiebedepots abgebaut. Damit konnte bewiesen werden, dass das Bauwerk den gewünschten Zweck perfekt erfüllt.

Über die Dauer des gesamten Zeitabschnitts vom Bau der Schlitzsperre 2009 bis Juni 2011 wurden ca. 28000 m<sup>3</sup> Geschiebe oberhalb der Sperre erodiert.

Durch das Vermessen des weiteren Bachbettverlaufs unterhalb der Sperre mittels Laserscanner konnten Flächen ausgewiesen werden, auf denen sich zwischenzeitlich Geschiebe abgelagerte, welches aber zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Gänze weiter flussabwärts transportiert wurde.

Es wurden aber auch Ablagerungsflächen ausgewiesen auf denen bis zur letzten Messung im Juni 2011 Geschiebe abgelagert blieb. Vor allem knapp vor der Mündung des Feistritzbaches in die Drau (auf dem Schwemmkegel) lagerten 12000 m<sup>3</sup> Geschiebe.

Dem zufolge wurden etwa 16000 m<sup>3</sup> Geschiebe in die Drau transportiert und somit wurde das Ziel des EU-LIFE-Projekts „Obere Drau“ erfüllt.

Da die Laserscanaufnahmen nur zeitlich punktuelle Aufnahmen sind, können unnatürliche Eingriffe durch Bauarbeiten und Geschiebeentnahme aber auch Hang- und Uferrutschungen nicht berücksichtigt werden. Außerdem beschränkt sich die Berechnung nur auf das festgelegte Scangebiet, daher sind Geschiebeumlagerungen, die von außen auf das Messgebiet einwirken, nicht erfasst. (Prokop, et al., 2011)

Bei dem Projekt am Col du Lautaret Testgelände (2058 m) in den französischen Alpen wurde getestet, inwieweit es möglich ist in kurzer Zeit die Daten genau und plausibel aufzunehmen, die zur dynamischen Lawinenmodellierung nötig sind. Dabei handelt es sich um Flächen- und Voluminabestimmungen des ausgelösten und abgegangenen Schnees sowie der Anbruchhöhe der Lawine.

Die Anbruchhöhe und die Auslösezone der Lawine können zwar grundsätzlich im Feld gemessen werden, sind aber meist wegen des schwierigen Geländes oder akuter Lawinengefahr nur schwer oder gar nicht zu erreichen.

Komplexer gestaltet sich die Aufnahme der Daten von Flächen und Volumina des durch die Lawinenauslösung bewegten oder sonst beeinflussten Schnees. Solche Berechnungen erfordern hochauflösende räumliche Schneedeckeninformation vor und nach dem Lawinenabgang.

In der Schnee- und Lawinenforschung werden immer häufiger terrestrische Laserscanner verwendet, um Schneehöhen über Flächen bis zu mehreren Quadratkilometern präzise zu kartieren.

In diesem Projekt wurden Messwerte eines terrestrischen Laserscans einer künstlich ausgelösten Lawine auf dem Col du Lautaret Testgeländes (2058m) in den französischen Alpen aufgenommen und die Ergebnisse zu Plausibilitätsprüfung der dynamischen Lawinenmodellierung verwendet. Zwei terrestrische Laserscans, einer vor und einer nach der Lawinenauslösung, lieferten die Schneeoberflächeninformationen, welche für die Analyse benötigt wurden. Die Scans waren über vermessene Kontrollpunkte und Multi Station Adjustment exakt referenziert und die daraus gewonnenen Daten wurden im GIS ausgewertet. Es wurden die Flächen und Volumina des a) abgleitenden Schnees der Auslösezone b) des mitgerissenen Schnees der Gleitbahn und c) des

Schnees in der Ablagerungszone errechnet. Außerdem wurden Informationen über Anbruchhöhe, Fließlänge und Lawinenbreite erstellt.

Ergänzende Messungen mit einer Totalstation und Schneedichtemessungen bieten Vergleichsdaten und damit eine Gütekontrolle der TLS – Daten. Die Resultate zeigen, dass terrestrisches Laserscanning in der Lage ist, in kurzer Zeit effizient exakte Lawinenmodellierungsdaten zu liefern. (Prokop, et al., 2014)

## 7. Literaturverzeichnis

**Barbolini, M. und Issler, D. 2006.** *Avalanche Test Sites and Research Equipment in Europe - An Updated Overview*. 2006. Final Report Deliverable D8, SATSIE Avalanche Studies and Model Validation in Europe, 172 Seiten.

**Besl, P. J. und McKay, N. D. 1992.** A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1992, Bd. 14, 2, Seiten 239 - 256.

**Deems, J. S., Painter, T. H. und Finn, D. C. 2013.** Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*. 2013, Vol. 59, No. 215.

**Eglit, M. E. und Demidov, K. S. 2005.** Mathematical modelling of snow entrainment in avalanche motion. *Cold Regions Science and Technology*. 2005, Bd. 43, 1.

**FranceTopo.** FranceTopo.fr beta. *FranceTopo.fr beta.* [Online] <http://francetopo.fr/>.

**Gruber, U. und Bartelt, P. 2007.** Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software*. Seiten 1472-1481, 2007, Bd. 22, 10.

**Interfab Snowbusiness GmbH.** [www.interfab.at](http://www.interfab.at). *Interfab Snowbusiness GmbH - In den Bergen sind wir zuhause*. [Online] Interfab Snowbusiness GmbH. [Zitat vom: 11. September 2013.] <http://www.interfab.at/de/Produkte/gazex.html?o=7&parent=LAWINENAUSL%D6SUNG&op=24>.

**IRSTEA. 2012.** IRSTEА. [www.irstea.fr](http://www.irstea.fr). [Online] IRSTEА, 2012. [Zitat vom: 11. September 2013.] <http://www.irstea.fr/en/research/research-units/etgr>.

**Kneubühl, F. K. und Sigrist, M. W. 1999.** *Laser*. 5., überarb. und erg. Aufl. Leipzig : B. G. Teubner Stuttgart, 1999. ISBN 3-519-43032-0.

**Lösler, M.** Laserscanner. <http://home.arcor.de/laserscanner/>. [Online] [Zitat vom: 02. April 2015.] <http://home.arcor.de/laserscanner/>.

- Panholzer, H. 2009.** Monitoring von Hangrutschungen mittels terrestrischen Laserscannings. *Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Studienrichtung Mountain Risk Engineering.* Gmunden : s.n., 2009.
- Prokop, A. 2008.** Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Regions Science and Technology.* 2008.
- Prokop, A. 2007.** *Die Anwendung des terrestrischen Laserscannens zur Naturgefahrenbeurteilung.* Fulda : s.n., 2007.
- Prokop, A. und Chiari, M. 2013.** Long term monitoring of geomorphologic changes caused by torrent. EGU Vienna : Poster, 2013.
- Prokop, A. und Panholzer, H. 2009.** Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2009, Bd. 9, Seiten 1921 - 1928.
- Prokop, A. und Singer, F. 2011.** *Endbericht IAN-Report 129 Terrestrisches Laserscannen von Geschiebeumlagerungen am Feistritzbach (im Rahmen des EU-Life-Projekts "Obere Drau") - unveröffentlicht.* Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien. 2011.
- Prokop, A., et al. 2013.** Determining Avalanche Modelling Input Parameters using Terrestrial Laser Scanning Technology. *Proceedings ISSW (International Snow Science Workshop).* 2013.
- Prokop, A., et al. 2014.** Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. *Cold Regions Science and Technology.* 2014.
- Pulfer, G., et al. 2013.** Retrieving avalanche basal friction law from high rate positioning of avalanches. *Proceedings ISSW (International Snow Science Workshop).* 2013.
- Redl, T. 2005.** Einsatz von Photogrammetrie und Laserscanning zur Dokumentation von Bauwerken. *Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Studienrichtung Geodäsie und Geophysik.* Wien : s.n., 2005.

**RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. 2012.** RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. *www.riegl.com*. [Online] 2012.

**Sovilla, B. 2004.** *Field experiments and numerical modelling of mass entrainment and deposition processes in snow avalanches*. Zürich : ETH Zürich, 2004. DISS. ETH NO. 15462.

**Sovilla, B. und Bartelt, P. 2002.** Observations and modelling of snow avalanche entrainment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002, Bd. 2, Seiten 169-179.

**Sovilla, B., et al. 2010.** Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: measurements from Vallée de la Sionne. *Journal of Geophysical Research*. 2010, Bd. 115, F2. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JF001390>.

**Sovilla, B., Margreth, S. und Bartelt, P. 2007.** On snow entrainment in avalanche dynamics calculations. *Cold Regions Science and Technology*. 2007, Bd. 47, 1-2, Seiten 69 - 79.

**Tauber, S. 2005.** *Untersuchung zur Mess- und Registriergenauigkeit des Laserscanners Riegl LMS Z360*. Hannover : s.n., 2005.

**Thibert, E., et al. 2008.** Avalanche impact pressure on an instrumented structure. *Cold Regions Science and Technology*. 2008, Bd. 54, Ausgabe 3, Seiten 206 - 215.

**www.kagis.ktn.gv.at.** Amt der Kärntner Landesregierung Abt. 8 - Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser & Naturschutz. [Online] <http://www.kagis.ktn.gv.at>.

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Laufzeitprinzip (Redl, 2005).....	3
Abbildung 2: Laserprinzip (Redl, 2005) .....	4
Abbildung 3: Diffuse Reflexion (Redl, 2005).....	6
Abbildung 4: Spiegelreflexion (Redl, 2005) .....	6
Abbildung 5: Retroreflexion (Redl, 2005) .....	6
Abbildung 6: Reflexionsvermögen von Schnee in Abhängigkeit der Korngröße (Warren, 1982; Painter & Dozier 2003) in (Prokop, 2008).....	7
Abbildung 7: Fehlerhafte Distanzmessung des Lasers bei Ecken und Kanten (Redl, 2005) .....	10
Abbildung 8: Messprinzip eines terrestrischen Laserscanners (Lösler) .....	11
Abbildung 9: Reflexionsintensitätsbild (Graustufen) (oben), Falschfarbenbild (nach Höhe eingefärbt) (Mitte), RGB-Bild welches mittels der Fotos der montierten Kamera eingefärbt wurde (unten) (Prokop, et al., 2011) .....	12
Abbildung 10: technische Daten LMS-Z420i (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	19
Abbildung 11: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	21
Abbildung 12: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	22
Abbildung 13: technische Daten Reflektor (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	24
Abbildung 14: Der LPM-321 und die zu untersuchende Lawine am Col du Lautaret, die am 13. Februar 2013 ausgelöst wurde; die zu scannende Fläche ist durch die rote Linie eingegrenzt. (Prokop, et al., 2013).....	25
Abbildung 15: In RGB-Farben eingefärbte Punktwolke von der Sperre in Schlitzbauweise - die schwarzen Stellen sind Scanschatten, also Bereiche, die von dem ausgesandten Laserstrahl wegen Verdeckung nicht erreicht werden können. (Prokop, et al., 2011) .....	27
Abbildung 16: Punktwolke in Graustufen (Intensität der Reflexion) der Sperre - an den rot markierten Stellen wurden die kreisrunden Reflektoren angebracht, um den Scan genau referenzieren zu können. (Prokop, et al., 2011) .....	28

Abbildung 17: Die ungefilterte Punktwolke in Graustufen (Prokop, et al., 2011)	29
Abbildung 18: Workflow: links oben: die Hilfsebene - links unten: ein zwei Meter breiten Geländestreifen - rechts oben: Vegetation markiert - rechts unten: "gereinigter" Scanstreifen (Prokop, et al., 2011) .....	29
Abbildung 19: "gereinigte" Punktwolke in Graustufen (Prokop, et al., 2011).....	30
Abbildung 20: Übersichtskarte Col du Lautaret (FranceTopo) .....	32
Abbildung 21: Übersichtskarte Feistritzbach (www.kagis.ktn.gv.at) .....	33
Abbildung 22: Totale Schneehöhe im Lawinenstrich vor der Auslösung. Als Referenz dienen ein 20 m Raster, 5 m Höhenschichtlinien (auf einem DEM basierend) sowie globale (Lambert, Zone III) als auch lokale Koordinaten. Die grün strichlierte Linie markiert die Straße, welche den Lawinenstrich kreuzt. (Prokop, et al., 2014) .....	35
Abbildung 23: Die Entwicklung der Lawine im oberen Auslösebereich - man erkennt gut, dass sich die Lawine aus vier kleinen Auslösezonen zusammensetzt, welche erst nach ein paar Sekunden zusammen fließen. In der jeweils linken unteren Ecke der Bilder ist das Gebiet der zweiten Auslösezone. (Prokop, et al., 2013) .....	36
Abbildung 24: 3D-Ansicht des digitalen Schneeoberflächenmodells des zweiten Scans, nachdem die Lawine ausgelöst wurde. Man kann die durch die Lawine verursachten Änderungen der Schneehöhen und die zwei Anbruch-/Auslösezonen sowie die Ablagerungszone erkennen. (Prokop, et al., 2014) ....	37
Abbildung 25: horizontale Karte der Ablagerungen mittels Totalstation aufgenommen. (Prokop, et al., 2013).....	40
Abbildung 26: Ablagerungsgrenzen und Frontpositionen der Lawinen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die schwarzen, roten, violetten und grünen Punkte zeigen die Position der Lawine zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die schwarzen Vierecke markieren die mittels Totalstation erhobenen Ablagerungsgrenzen. (Prokop, et al., 2014) .....	43
Abbildung 27: Scanbereich oberhalb der neu gebauten Sperre (Prokop, et al., 2011).....	45
Abbildung 28: Panoramabilder des Scanbereichs aus unterschiedlichen Perspektiven (bläulich eingefärbt 2011, normal gefärbt 2008) (Prokop, et al., 2011).....	46

Abbildung 29:	Geschiebebilanzkarte	27.10.2008 - 31.05.2011	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		47
Abbildung 30:	Geschiebebilanzkarte	27.10.2008 - 16.11.2009	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		49
Abbildung 31:	Geschiebebilanzkarte	16.11.2009 - 13.04.2010	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		50
Abbildung 32:	Geschiebebilanzkarte	13.04.2010 - 25.11.2010	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		51
Abbildung 33:	Geschiebebilanzkarte	25.11.2010 - 31.05.2011	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		52
Abbildung 34:	Scanabschnitt des obersten gemessenen Bereichs des		
	Feistritzbachs (Prokop, et al., 2011).....		53
Abbildung 35:	Panoramabild des obersten Scanabschnitts (Prokop, et al., 2011)		
	.....		53
Abbildung 36:	Geschiebebilanzkarte	16.11.2009 – 31.05.2011	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		54
Abbildung 37:	Geschiebebilanzkarte	27.10.2008 - 16.11.2009	des
	Scanabschnitts oberhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		55
Abbildung 38:	Scanabschnitt 3 - unterhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011).....		56
Abbildung 39:	Panoramabild des Scanabschnitts 3 (Prokop, et al., 2011).....		56
Abbildung 40:	Geschiebebilanzkarten verschiedener Zeitabschnitte des		
	Scanbereichs unterhalb der Sperre (Prokop, et al., 2011) .....		57
Abbildung 41:	Scanabschnitt 4 (Prokop, et al., 2011) .....		58
Abbildung 42:	Panoramabild des Scanabschnitts 4 (Prokop, et al., 2011).....		58
Abbildung 43:	Geschiebebilanzkarte	16.11.2009 - 31.05.2011	des
	Scanabschnitts 4 (Prokop, et al., 2011).....		59
Abbildung 44:	Scanabschnitt 5 (Prokop, et al., 2011) .....		60
Abbildung 45:	Panoramabild des Scanabschnitts 5 (Prokop, et al., 2011).....		60
Abbildung 46:	Geschiebebilanzkarte	16.11.2009 - 31.05.2011	des
	Scanabschnitts 5 (Prokop, et al., 2011).....		61
Abbildung 47:	Scanabschnitt 6 (Prokop, et al., 2011) .....		62
Abbildung 48:	Panoramabild des Scanabschnitts 6 (Prokop, et al., 2011).....		62

Abbildung 49: Geschiebebilanzkarte 16.11.2009 - 31.05.2011 des Scanabschnitts 6 - Becken des Schwemmkegels oberhalb der Mündung in die Drau (Prokop, et al., 2011).....	63
Abbildung 50: Poster EGU 2009.....	78

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reflexionskoeffizienten für diffus reflektierendes Material bei 900 nm Wellenlänge (Redl, 2005).....	8
Tabelle 2: technische Daten LMS-Z420i (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	20
Tabelle 3: technische Daten LPM-321 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2012).....	23
Tabelle 4: Gemessene Lawinenparameter; die Spalte "old" wurde in dem Artikel für die ISSW 2013 veröffentlicht, "revised" sind die aktuellen, überarbeiteten Ergebnisse (Prokop, et al., 2014).....	38
Tabelle 5: Lawinenbreite und Hangneigung an der jeweiligen Stelle X [m] (Prokop, et al., 2014).....	40
Tabelle 6: Geschiebebilanz des ersten Scanabschnitts im Zeitraum 27.10.2008 – 31.05.2011 (Prokop, et al., 2011).....	46
Tabelle 7: Gesamte Geschiebebilanz des ersten Scanabschnitts vom 27.10.2008 - 31.05.2011 (Prokop, et al., 2011).....	48

## 10. Formelverzeichnis

Formel (1) Zusammenhang Laufzeit und Entfernung (Kneubühl, et al., 1999)..3	
Formel (2) Zuwachsindex (Sovilla, 2004).....40	

## 11. Appendix

Die Ergebnisse der Laserscans und der Massenbilanzierung am Feistritzbach wurden in Form eines Posters auf der EGU 2009 präsentiert.

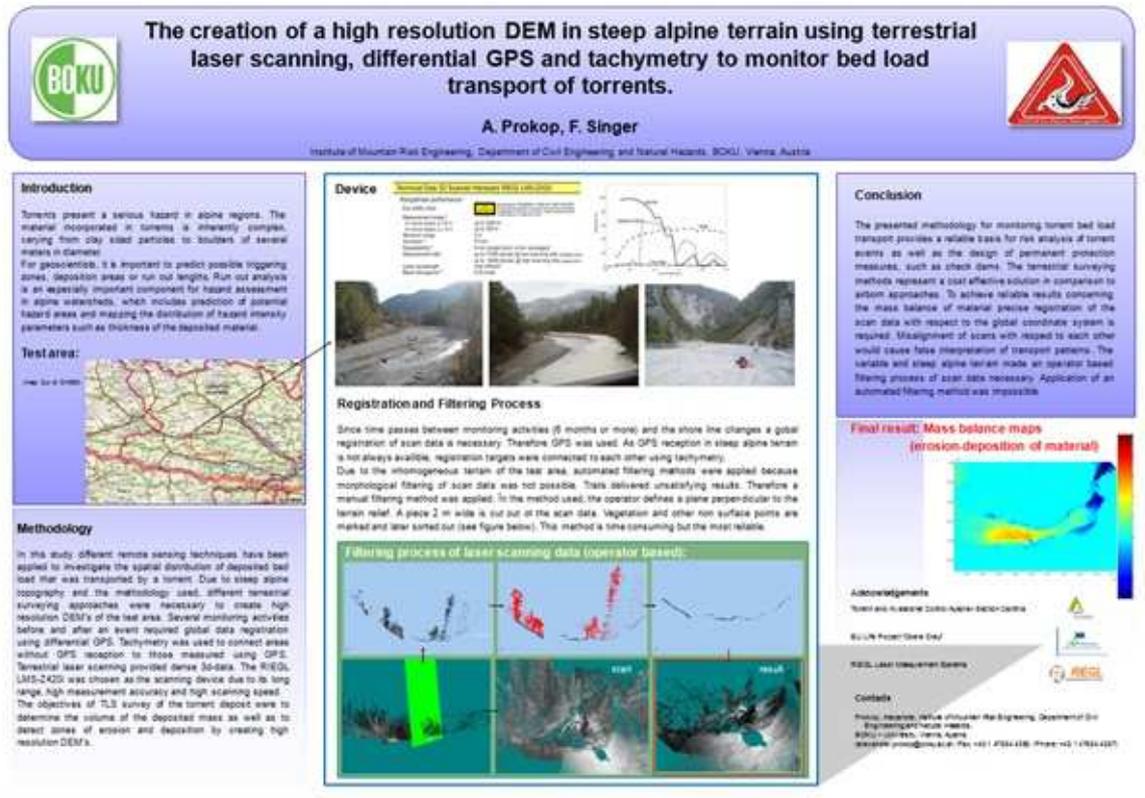


Abbildung 50: Poster EGU 2009

Die Ergebnisse des Scans am Col du Lautaret wurden schon 2014 in dem wissenschaftlichen Journal „Cold Regions Science and Technology“ veröffentlicht.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.11.009>