

# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## „Berechnung von Geschiebefrachten mit Hilfe multitemporaler ALS-Daten“ am Beispiel der Bregenzerach

vorgelegt von

**Bernadette Sotier**  
U 1305, UNIGIS MSc Jahrgang 2007

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Ecking, 30.Juni 2009

## Vorwort

An dieser Stelle möchte ich zuerst all den lieben Menschen danken, die mich in den letzten zweieinhalb Studienjahren immer wieder angefeuert, meine Launen mit Langmut ertragen und meinen Garten vor Verwilderung bewahrt haben.

Danke Margret und Axel fürs Korrekturlesen.

Danke Klaus und Gerhard für die Möglichkeit, auch während der Arbeitszeit schreiben zu dürfen.

Danke Christian, Volker und Freddy für so manche (technische) Unterstützung und für die Software.

Dankeschön auch an Herrn Peter Drexel vom LVA Feldkirch für die unkomplizierte und bereitwillige Überlassung von vielen Millionen Laserpunkten.

## **Erklärung**

"Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden sind entsprechend gekennzeichnet."

Ecking, 30. Juni 2009

## **Kurzfassung**

Multitemporale Laser-Geländemodelle können dazu verwendet werden, um die Verlagerungen von Geschiebe in einem Gebirgsfluss während eines extremen Hochwasserereignisses zu berechnen.

Mit Hilfe der Airborne Laserscanning-Technologie (ALS) können sehr hoch aufgelöste Oberflächen- und Geländemodelle hergestellt werden, so dass auch Veränderungen im Sub-Meterbereich detektiert werden können. Somit hat man die Möglichkeit, die Geschiebedynamik eines Flusses flächenhaft darzustellen und Prozesse wie Seiten- und Sohlerosion, Auflandung und Umlagerung quantitativ zu erfassen.

Die Geschiebeberechnung wird am Beispiel der Bregenzerach (Vorarlberg) durchgeführt, die vom Hochwasser vom 22. und 23. August 2005 besonders schwer getroffen wurde.

Für die Berechnungen werden die vom Landesvermessungsamt Feldkirch zur Verfügung gestellten Rastermodelle verwendet.

Diese weisen in Wald- und Siedlungsbereichen größere Fehler auf, die eine Folge der Filterung bzw. der dadurch verringerten Punktdichte sind.

Mit Hilfe einfacher statistischer Kennwerte wird versucht, die Größenordnung des Fehlers abzuschätzen und das Geschiebevolumen zu korrigieren.

Um zu testen, inwieweit diese Höhenfehler durch eine angepasste Filterung steuerbar sind, werden aus den Rohdaten der Lasermessung mit Hilfe eines morphologischen Filters Geländemodelle hergestellt und mit den Rastermodellen verglichen.

## **Abstract**

Multitemporal digital terrain models derived from Airborne Laserscanning (ALS) are used for the analysis of geomorphological changes, which were triggered by heavy flood events.

ALS is a widely used remote sensing technology to generate high-quality digital elevation models. Changes in a sub-meter range can be detected with this method.

Therefore it is possible to determine fluvial processes such as erosion, deposition and bedload transfer quantitatively.

The calculation of sediment volumes with ALS-data is performed for the Bregenzerach in Vorarlberg (Austria). The river was heavily concerned by the flood event in August 2005.

In forested and residential areas an error was detected, which is caused by filter processes and associated reduction of point density.

The magnitude of this error has to be estimated by simple statistical methods with the differential grids in order to adjust the calculated sediment volumes.

Additionally, a filter test with the raw point data cloud was performed in order to estimate the influence of different filter parameters on the altitude error.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung .....</b>	<b>9</b>
1.1 Problemstellung und Ziel .....	9
1.2 Struktur der Arbeit .....	11
<b>2. Stand der Forschung und Literatur.....</b>	<b>12</b>
2.1 Funktionsprinzip des Airborne Laserscanning (ALS).....	12
2.2 Geländemodelle aus Laserscanning-Daten .....	14
2.2.1 Klassifizierung der Rohdaten.....	14
2.2.2 Interpolation.....	15
2.3 Veränderungsanalyse mit Laserdaten.....	16
<b>3. Geschiebe und Gewässermorphologie.....</b>	<b>18</b>
3.1 Geschiebe – Schwebstoff.....	19
3.2 Geschiebepbewirtschaftung .....	21
3.3 Erfassung des Geschiebetransports .....	22
<b>4. Lösungsansatz.....</b>	<b>23</b>
4.1 Methoden .....	25
4.1.1 Filterung.....	25
4.1.2 Interpolation.....	26
4.1.3 Berechnung des Differenzmodells.....	27
4.1.4 Volumenbilanz .....	27
4.2 Die Daten .....	28
4.3 Datenaufbereitung in LIS Desktop.....	30
4.3.1 Gebietsabgrenzung .....	31
4.3.2 Import der Laserdaten .....	31

4.3.3	Aggregation der Raster aus der Punktwolke.....	32
4.3.4	Filterung.....	32
4.3.5	Interpolation.....	34
4.3.6	Differenz und Volumenberechnung .....	34
4.3.7	Ableitung des Gerinneprofils .....	35
<b>5.</b>	<b>Projektbeschreibung .....</b>	<b>36</b>
5.1	Auswahl des Untersuchungsgebietes .....	36
5.2	Das Untersuchungsgebiet .....	36
5.3	Das Hochwasserereignis im August 2005.....	41
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>44</b>
6.1	Explorative Datenanalyse.....	44
6.2	Geschiebebilanz.....	49
<b>7.</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>59</b>
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>61</b>
<b>9.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>61</b>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Messprinzip (EarthData 2007)</i> .....	12
<i>Abbildung 2: Mehrfachreflexionen (aus Katzenbeisser 2004)</i> .....	14
<i>Abbildung 3: Aufbau einer Gerinnesoble (Quelle: Rutschmann 2006)</i> .....	19
<i>Abbildung 4: Filter- und Interpolations-Effekte</i> .....	24
<i>Abbildung 5: Reduzierte Punktdichte nach der Filterung der Rohdaten.</i> .....	26
<i>Abbildung. 6: Auszug aus einem ASCII-File</i> .....	31
<i>Abbildung 7: Höhencodiertes (5 m) Geländemodell des Mittellaufs</i> .....	35
<i>Abbildung 8: Übersichtskarte Vorarlberg (links) und Detailausschnitt des Untersuchungsgebietes (rechts)</i> .....	37
<i>Abbildung 9: Gerinne-Längsprofil</i> .....	40
<i>Abbildung 10: Niederschlagssummen vom 19. – 24. August 2005</i> .....	42
<i>Abbildung 11: Frequenzdiagramm für den Pegel Au / Bregenzerach</i> .....	42
<i>Abbildung 12: Differenz-Grid Testgebiet 1</i> .....	46
<i>Abbildung 13: Ausschnitt aus Differenz-Grid Testgebiet 2</i> .....	47
<i>Abbildung 14: Ereignisfracht und Bilanz der Teilstrecken</i> .....	49
<i>Abbildung 15: Kumulierte Volumendifferenzen</i> .....	50
<i>Abbildung 16: Querprofil bei km 31,6 (Blickrichtung flussaufwärts)</i> .....	52
<i>Abbildung 17: Querprofil bei km 46,1 (Blickrichtung flussaufwärts)</i> .....	53
<i>Abbildung 18: Querprofil flussauf von Mellau (km 42)</i> .....	55
<i>Abbildung 18: Querprofil über die aus den Rohdaten berechneten DGM</i> .....	56
<i>Abbildung 20: Lage der Profile 0 bis 4</i> .....	67
<i>Abbildung 21: Lage der Profile 5 und 6</i> .....	68

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Die verwendeten LIS Module .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 2: Geschätzte, jährliche Geschiebefracht aus den Seitengewässern bis Mellau .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabelle 3: Statistische Kennwerte für das Testgebiet 1 .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 4: Statistische Kennwerte für das Testgebiet 2 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 5: Statistische Kennwerte für das Testgebiet 2 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 6: Filteroptionen .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 7: Veränderungen der Geschiebevolumina .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 8: Geschiebevolumina in den Gerinneabschnitten .....</i>	<i>74</i>

# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung und Ziel

Extreme Hochwasserereignisse mobilisieren in den Gebirgsflüssen der Alpen enorme Geschiebemengen, was häufig die Gefahrensituation verschärft. In kritischen Gerinneabschnitten entstehende Geschiebeablagerungen haben massive Ausuferungen zur Folge und verursachen dadurch große Schäden.

Um das Verhalten Geschiebe führender Gewässer besser einschätzen bzw. modellieren zu können, werden Angaben zu Geschiebemenge und Prozessen benötigt. Diese sind i. d. R. nur sehr schwer zu erfassen.

Mit Hilfe von Höheninformationen aus Laserscanning können jedoch Veränderungen der Topographie gemessen werden.

Das Auguthochwasser ist das erste große Ereignis, das in den betroffenen Gebieten Österreichs und der Schweiz großflächig mit Laserdaten abgedeckt ist, die den Stand vor und nach dem Ereignis dokumentieren.

Die Technologie des Airborne Laserscanning hat sich mittlerweile zu einer Standardmethode zur Herstellung sehr hoch aufgelöster Geländemodelle entwickelt. Die Genauigkeit dieser Geländedaten erlaubt es, Veränderungen in der Topographie zu erkennen und zu messen.

Da Geländemodelle aus Laserbefliegungen im Ernstfall sehr rasch bereitgestellt werden können, ermöglichen sie es, die Situation unmittelbar nach einem Ereignis festzuhalten.

Kommerziell hergestellte Laser-Geländemodelle aus der Zeit vor und nach dem Hochwasserereignis vom August 2005 bilden auch die Datengrundlage für die Durchführung dieser Arbeit.

Ziel ist es, durch Subtraktion der beiden Geländemodelle die bei dem Ereignis bewegten Geschiebevolumina in einem 27 km langen Streckenabschnitt der Bregenzerach zu quantifizieren und besonders aktive Gerinnebereiche zu identifizieren.

Die Methode ist in der Literatur bereits gut dokumentiert und eignet sich bestens für freie Fließstrecken. Unter Wald sind jedoch größere Fehler bei der Bestimmung der Geländehöhen und somit auch des Geschiebevolumens zu erwarten. Laserstrahlen durchdringen Wald - abhängig vom Belaubungsgrad - nur bis zu

einem gewissen Grad, weshalb dort die Repräsentationsgenauigkeit des Geländemodells gegenüber freien Flächen geringer ist.

Aufgrund der engen Verzahnung von Aue und Flussbett in stark Geschiebe führenden Gebirgsflüssen finden jedoch Auflandungsprozesse auch häufig im Wald statt.

Es soll untersucht werden, welche Größenordnung der Fehler im Untersuchungsgebiet hat und wie er sich auf das Berechnungsergebnis auswirkt.

Die Größenordnung des Volumenfehlers wird mit Hilfe einfacher statistischer Kennwerte der Höhendifferenzen abgeschätzt.

Folgende Fragen sollen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden:

- Welche Geschiebemengen wurden bei dem untersuchten extremen Hochwasser vom 22./23. August 2005 von der Bregenzerach transportiert und wo lagen die Schwerpunkte?
- Können die berechneten Geschiebevolumina mit den vorhandenen Modellrechnungen und den Angaben aus der offiziellen Hochwasserdokumentation in Einklang gebracht werden?
- Wie hoch sind die Fehler der Volumenberechnung und wie sieht ihre räumliche Verteilung aus?
- Welchen Einfluss hat die Filterung auf das Ergebnis?

Es kann keine absolute Fehleranalyse mit den Geländemodellen durchgeführt werden, da keine terrestrisch vermessenen Kontrollpunkte / -flächen vorhanden sind.

Es sollen auch keine Maßnahmen abgeleitet werden.

Die Daten in eine Geschiebmodellierung einfließen zu lassen, wäre sicher sinnvoll, ist aber ebenfalls nicht Gegenstand dieser Arbeit.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in 8 Abschnitte gegliedert.

Nach der Zieldefinition in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 ein grober Überblick über den Stand der Technik (Funktionsprinzip ALS) gegeben. Anschließend wird die Aufbereitung der Rohdaten bis zur Fertigstellung der gängigen ALS-Produkte Oberflächenmodell und Geländemodell erläutert.

Eine Literaturübersicht zur Anwendung multitemporaler ALS-Daten schließt dieses Kapitel ab.

In Kapitel 3 werden die wichtigsten Aspekte zum Geschiebehauhalt von Fließgewässern erläutert. Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf die Feststoffbilanz werden hier kurz zusammengefasst und es wird auf die Bedeutung einer angepassten Geschiebemanagement hingewiesen. Der letzte Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich mit den gängigen Methoden der Geschiebemanagement.

Die Methoden, die für die Analyse der Laserdaten im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden, sind Thema von Kapitel 4. Es werden die verwendeten Daten vorgestellt und der Arbeitsablauf der Datenaufbereitung beschrieben.

Die Beschreibung des Projektgebietes, die Charakterisierung des Geschiebehauhalts der Bregenzerach und eine kurze Zusammenschau der Ereignisse vom 22. und 23. August 2005 ist in Kapitel 5 nachzulesen.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Volumenberechnungen unter Berücksichtigung der Fehleranalyse zusammengefasst und anhand von konkreten Beispielen näher erläutert.

In Abschnitt 7 folgt eine kritische Diskussion, in der vor allem noch einmal auf den Genauigkeits-Aspekt und die Möglichkeiten bzw. Grenzen dieser Methode eingegangen wird.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

## 2 Stand der Forschung und Literatur

Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Grundprinzipien der Airborne Laser Scanning (ALS) – Technologie vorgestellt, sofern sie für das Verständnis der in dieser Arbeit verwendeten Verarbeitungsmethoden von Bedeutung sind.

Zu den technischen und mathematischen Details und den neuesten Trends in der Scannerentwicklung existiert reichlich Literatur. Einen guten Einstieg in die Thematik bieten z. B. *Wever & Lindenberger, 1999*, *Katzenbeisser & Kurz, 2004*, *Brenner et al., 2006* oder *CRAMS, 2006*. Leicht verständliche Einführungen sind auch auf den Webseiten der gängigen Scannerhersteller (z. B. *Optech, [www.optech.ca](http://www.optech.ca)*, *Riegl, [www.riegl.com](http://www.riegl.com)*, *TopoSys, [www.toposys.de](http://www.toposys.de)*) bzw. vieler Befliegungsfirmen (*TopScan, [www.topscan.de](http://www.topscan.de)*, *TopoSys, [www.topoys.de](http://www.topoys.de)*, *Helimap, [www.helimap.de](http://www.helimap.de)*) zu finden. Bei *Baltsaviats 1999* werden die mathematischen bzw. geometrischen Grundprinzipien ausführlich dargestellt.

### 2.1 Funktionsprinzip des Airborne Laserscanning (ALS)

Die Laserscanning-Technologie ist eine aktive Fernerkundungsmethode. Ein Sensor emittiert Laserlicht im nahen Infrarot (NIR, zwischen 1000 – 1500 nm) mit einer sehr hohen Pulsfrequenz (20 – 200 kHz). Der Laserstrahl wird an der Erdoberfläche reflektiert und von einem Empfänger registriert. Aus der Laufzeit des Signals errechnet sich die Distanz zum reflektierenden Objekt.

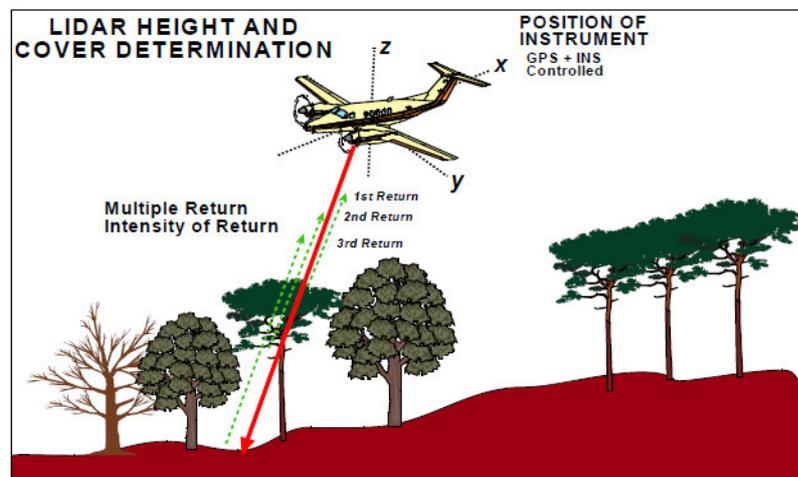


Abbildung 1: Messprinzip (EarthData 2007)

Position und Orientierung des Sensors werden mit Hilfe von IMU (inertial measurement unit) und GPS gemessen. Die mit den Positionsdaten synchronisierten Distanzmessungen ermöglichen so die genaue Verortung jedes einzelnen Laser-Pulses in Länge, Breite und Höhe (direkte Georeferenzierung).

Dabei kommt der Kalibrierung der Messgeräte vor und während der Mission eine besondere Bedeutung zu. Schon geringe Fehler v. a. bei der Bestimmung der Raumorientierung des Messsystems führen zu erheblichen systematischen Lagefehlern in der Punktwolke, die durch große Flughöhen und Relief noch verstärkt werden.

Verteilung und Dichte der Messpunkte innerhalb eines Flugstreifens hängen einerseits ab vom verwendeten Sensor-System (Scanrate, Messfrequenz und Scanwinkel), andererseits von Flughöhe und Fluggeschwindigkeit. Die Punktdichte hat wiederum Einfluss auf die Repräsentationsgenauigkeit der Oberflächen- und Geländemodelle, die aus den Laserdaten abgeleitet werden.

#### Prozessierung der Rohdaten

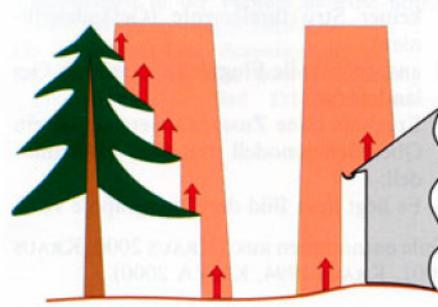
Die Rohdaten durchlaufen nach der Befliegung eine aufgrund der großen Datenmengen relativ zeitaufwändige, jedoch weitgehend automatisierte Nachbearbeitung (Post-Processing).

Folgende Prozessierungsschritte sind erforderlich:

- Synchronisierung der Mess- und Positionsdaten
- Korrektur der Positionsdaten mittels DGPS. Voraussetzung dafür sind synchron zur Befliegung aufgezeichnete Positionsdaten einer oder (besser) mehrerer GPS-Referenzstationen.
- Entfernung von Ausreißern
- Berücksichtigung von Transformationsparametern, um die i. d. R WGS84 - referenzierten Rohdaten im lokalen Referenzsystem zu verankern
- Höhenabgleich der Flugstreifen in den Überlappungsbereichen
- Höhenabgleich mit Referenzflächen zur Verbesserung der absoluten Genauigkeit

## 2.2 Geländemodelle aus Laserscanning-Daten

Ein Laserpuls kann mehrere Reflexionen erzeugen, z. B. auf dem Dach eines Hauses oder im Vegetationskörper und dem Erdboden (siehe Abb. 2). Der erste Laserpuls repräsentiert die oberste Fläche, auf die der Laserstrahl trifft, während der letzte Laserpuls mit größerer Wahrscheinlichkeit vom Erdboden stammt.



*Abbildung 2: Mehrfachreflexionen (aus Katzenbeisser 2004)*

Die Mehrfachreflexionen werden über die Laufzeit getrennt. Abhängig von der Bauart des Scanners ist es möglich, neben erstem Echo (first pulse) und letztem Echo (last pulse) noch weitere Zwischenreflexionen zu registrieren. Für die Herstellung digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle reicht es i. d. R. aus, das erste und das letzte Echo aufzuzeichnen.

### 2.2.1 Klassifizierung der Rohdaten

Die Rohdaten einer Lasermessung liefern primär nur geometrische Information über ihre Lage im Raum. Um ein Geländemodell berechnen zu können, müssen zuerst die Punkte, die vom Erdboden reflektiert wurden, von den Reflexionen aus der Vegetation, von Hausdächern, Autos, Stromleitungen etc. getrennt werden. Dazu werden in einem Raster von 0,5 oder 1 m die tiefsten Werte der Last-Pulses extrahiert und mit Hilfe eines Filters in Boden- und Nicht-Boden-Punkte klassifiziert. Besonders in dichten und / oder sehr steilen Waldbeständen liegt der tiefste Punkt sehr häufig nicht am Erdboden, sondern in den unteren

Kronenbereichen, weshalb i. d. R. mehrere Filterschritte und manuelle Nachbearbeitungen nötig sind (*TopScan 2008*).

Mittlerweile steht eine große Auswahl an Algorithmen für die verschiedensten Ansprüche und Datenqualitäten zur Verfügung. Auf die Grundprinzipien und Vorzüge der verschiedenen Filtertechniken kann an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Ein Überblick über die Funktionsweise einiger Filter und ein umfassender Test der Methoden ist jedoch bei *Sithole & Vosselman (2004)* nachzulesen. In dieser Studie kommen die Autoren u. a. zu der Erkenntnis, dass

- a) alle Filter Probleme mit komplexen Oberflächen (z. B. Stadtlandschaften) haben,
- b) diese Fehler schwerer wiegen als die Unsicherheiten, welche durch die Reduktion der Punktdichte in Folge der Filterung entstehen.

Der in dieser Arbeit verwendete progressive morphologische Filter nach *Zanbg et al. (2002)* wird in Abschnitt 4.1.1 beschrieben.

### 2.2.2 Interpolation

Im letzten Schritt werden die Bodenpunkte zu einem Geländemodell interpoliert. Die Repräsentationsgenauigkeit der Geländeoberfläche hängt – abgesehen von der Dichte der Stützpunkte - ganz entscheidend von der verwendeten Interpolationstechnik ab. Die Wahl der „richtigen“ Methode ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Eine Zusammenstellung und Bewertung der gängigen Interpolationsmethoden für Geländedaten wurde z. B. von *Hengl (2009)* vorgenommen. Generell kann gesagt werden, dass

- a) es – wie auch bei der Filterung - DIE Methode nicht gibt,
- b) sie sich um so weniger auf das Ergebnis auswirkt, je größer die Datendichte ist (*Hengl 2009*)

Bei Laserdaten hat die Wahl der Interpolationsmethode dann Bedeutung, wenn die Punktdichte durch Filterung in Wald- und Siedlungsbereichen stark reduziert ist.

Die Abgrenzung von Strukturen bzw. das Erkennen von Veränderungen unter Waldbedeckung sind dadurch mit Unsicherheiten behaftet.

### 2.3 Veränderungsanalyse mit Laserdaten

In vielen Ländern stehen mittlerweile flächendeckend Gelände- und Oberflächenmodelle aus ALS in einer hohen Auflösung (1 m) zur Verfügung. Damit existieren ausreichend genaue und qualitativ hochwertige Datengrundlagen, um großräumige morphologische Veränderungen an der Erdoberfläche analysieren und quantifizieren zu können. Sowohl die erreichbaren Genauigkeiten in der Georeferenzierung als auch die ständige Weiterentwicklung der Scanner machen es mittlerweile möglich, Veränderungen im Sub-Meterbereich sichtbar zu machen.

Große Bedeutung haben multitemporale Laserhöhenmodelle für Monitoring - Anwendungen in Risiko- und Krisenmanagement.

Beobachtungsobjekt solcher Projekte sind z. B. großräumige Hangbewegungen (z. B. *Dewitte 2008, Corsini et al. 2009*). Der Einsatz von Laserdaten zur Quantifizierung morphologischer Veränderungen durch Erosion und Massenverlagerungen ist beispielsweise von *Thoma et al. (2005), White & Wang (2002), Mitsova et al. (2005) und Barber (2007)* dokumentiert worden. Sehr häufig werden Laserdaten auch in Kombination mit photogrammetrischen und terrestrischen Informationen sowie anderen Fernerkundungstechniken zur Analyse längerer Zeitreihen eingesetzt (*Corsini et al. 2009, Dewitte 2008, Metternicht 2005*).

*Geist (2002)* demonstriert die Eignung von Differenzmodellen aus Laserdaten zur Ermittlung von Gletscher – Massenbilanzen.

Vor allem im militärischen Kontext versucht man, „change detection“ mittels ALS für den Einsatz in Krisensituationen zu operationalisieren. *Butkiewicz et al. (2008)* beschreiben eine Methode zur intelligenten Datenerhebung mit Hilfe unbemannter Drohnen. Dabei werden die Rohdaten in Echtzeit über ein statistisches Verfahren auf Redundanz geprüft und verworfen, falls keine Veränderungen erkannt wurden.

Eine mittlerweile schon recht ausgereifte Anwendung von ALS-Daten ist die Beobachtung der Siedlungsentwicklung (sehr wichtig z. B. in schnell wachsenden

Mega-Cities). Veränderungen im Gebäudebestand sind in den Oberflächenmodellen relativ leicht zu detektieren. Hier geht die Entwicklung hin zu einer automatisierten Erkennung neuer Gebäude bzw. der Vektorisierung von Gebäudegrundrissen (z. B. *Walter 2005, Vu 2004, Zhu 2008*).

Auch in der Dokumentation von Naturereignissen werden multitemporale Laserdaten bereits häufig verwendet.

*Rehor (2007)* entwickelte einen Algorithmus zur Klassifizierung von Gebäudeschäden in Folge eines Erdbebens.

Als weiteres Beispiel sei die Arbeit von *Scheidl (2008)* erwähnt, der anhand zweier Wildbäche im Berner Oberland (Schweiz) eine differenzierte Betrachtung der durch das Augusthochwasser 2005 ausgelösten Muren vorstellt. Bei *Chiari et. al (2008)* wird das – ebenfalls im August 2005- im Suggadinbach (Vorarlberg) verlagerte Geschiebe auf der Grundlage zweier Laser-Geländemodelle berechnet und mit den Ergebnissen einer eindimensionalen Geschiebmodellierung mit dem Geschiebmodell SETRAC verglichen. Auch *Kessler (2005)* weist auf das große Potential von ALS-Daten zur Rekonstruktion von Hochwasserereignissen hin und belegt dies am Beispiel des Lutzbaches in Vorarlberg. Aufgrund ihrer inhaltlichen und räumlichen Nähe zum Untersuchungsgebiet stellen die letztgenannten Quellen eine wichtige Referenz für die Interpretation der Ergebnisse dar.

## 3 Geschiebe und Gewässermorphologie

### 3.1 Begriffe

Die Gewässermorphologie oder fluviale Geomorphologie beschäftigt sich mit den Prozessen in Fließgewässern und dem daraus entstehenden Formenschatz.

Die morphologische Ausgestaltung eines Fließgewässers wird durch das Kräfteverhältnis aus Abfluss und Materialtransport bestimmt.

Der Abfluss ist definiert als „das Wasservolumen, das aus einem Einzugsgebiet unter dem Einfluss der Schwerkraftbeschleunigung in einer Zeiteinheit abfließt“ (*Wilhelm, 1993*). Die den Gebietsabfluss steuernden Parameter sind einerseits die naturräumlichen Gegebenheiten des Einzugsgebiets wie Relief, Geologie, Böden und Vegetation und andererseits die klimatischen Verhältnisse. Alle diese Faktoren stehen miteinander in enger Wechselwirkung und bilden ein sensibles Gleichgewicht.

Jedes „in Bewegung befindliche Gewässer“ (*Leser 1993*) ist in der Lage zu erodieren und das erodierte Material zu transportieren. Menge und Korngröße des transportierten Materials sind abhängig von Abflussmenge und Abflussgeschwindigkeit sowie dem Feststoffvorrat bzw. der Erodierbarkeit des Materials im Einzugsgebiet.

Die Sedimentfracht oder sediment yield ist ...“ *der gesamte Sedimentaustrag für ein Einzugsgebiet oder eine bestimmte Messstelle während eines festgelegten Zeitraums*“ ([www.wasser-wissen.de](http://www.wasser-wissen.de), Stand Juni 2009)

Das idealisierte Längsprofil eines Fließgewässers lässt sich in einen steilen Oberlauf, einen Mittellauf und einen flachen Unterlauf gliedern. Aufgrund der Gefälleverhältnisse und der damit verbundenen möglichen Transportkräfte ist im Oberlauf die Erosion der vorherrschende Prozess, während im Unterlauf Akkumulation überwiegt. Dazwischen liegt eine Transportstrecke, auf der hauptsächlich Material umgelagert wird.

### 3.2 Geschiebe – Schwebstoff

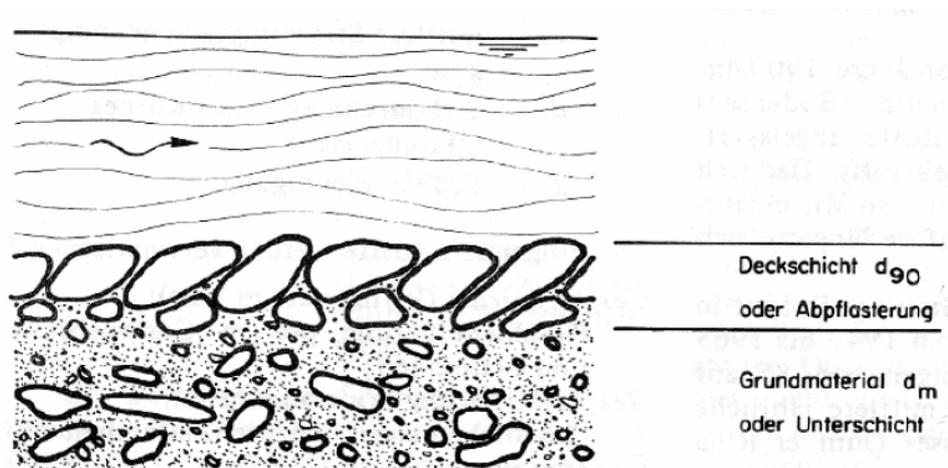
Die von einem Fließgewässer transportierten Feststoffe werden in Geschiebe und Schwebstoffe unterschieden.

Schwebstoffe sind Feststoffe, die „mit dem Wasser im Gleichgewicht stehen oder durch Turbulenzen in Schwebelage gehalten werden.“ (Habersack 2008). Schwebstoffe werden auch schon bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten transportiert und verursachen bei erhöhter Konzentration eine Trübung des Wassers.

Geschiebe (Grobsand, Kies und Steine mit Korngrößen  $> ca. 5\text{ mm}$ ) wird gleitend, rollend oder springend auf oder nahe an der Gewässersohle bewegt.

Es wird i. d. R. nur bei Hochwasser transportiert, sobald die Schleppkraft des Wassers einen bestimmten Grenzwert überschreitet (Grenzschubspannung).

In einem natürlichen, stabilen Gerinne bildet sich mit der Zeit an der Gewässersohle eine Deckschicht aus größerem Material aus, welche das darunter liegende feinere Material vor Abtrag schützt.



**Abbildung 3:** Aufbau einer Gerinnesohle (Quelle: Rutschmann 2006)

Ist die hydraulische Belastung jedoch sehr hoch, kommt es zum Aufreißen der Deckschicht. In der Folge kann auch die Unterschicht ausgeräumt werden und es findet Tiefenerosion statt.

Im Alpenraum bestimmt i. W. das Geschiebe die Morphologie und die Sohlstabilität der Fließgewässer, obwohl dessen Anteil am gesamten Feststoffhaushalt mit ca. 10 % vergleichsweise gering ist.

Im natürlichen Zustand unterliegt ein Fließgewässer durch Umlagerung des Geschiebes ständigen morphologischen Veränderungen, die als Ausdruck der im jeweiligen Gerinneabschnitt herrschenden Gleichgewichtsverhältnisse zu sehen sind. Größere Hochwasserereignisse können den Gewässerlauf mitunter völlig umgestalten und neue Fließrinnen schaffen.

Diese natürliche Dynamik wird durch flussbauliche Maßnahmen unterbunden, was häufig gravierende Änderungen für den Geschiebehaushalt bedeutet. Die häufigsten Eingriffe sind (*Schälchli, 2005*):

- Einengungen und Begradigungen. Sie erhöhen die Fließ-Geschwindigkeit und somit auch die Transportkapazität. Durch die verstärkte Sohlerosion nimmt die Geschiebefracht im Unterlauf stark zu;
- Uferverbauungen, Sohlsicherungen und Geschiebesammler in den Zubringern. Der Geschiebeeintrag wird vermindert, was ebenfalls in erhöhter Transportkapazität und einer Zunahme der Sohlerosion resultiert;
- Stauwerke und Wasserkraftwerke verzögern oder behindern den Geschiebedurchgang;
- Kommerzielle Kiesentnahmen.

Ein Geschiebedefizit führt im Hochwasserfall zu massiven Sohleintiefungen, Seitenerosion und Zerstörung von Schutzbauten auf freien Flussstrecken.

Ein Geschiebeüberschuss hat Auflandungen der Gewässersohle zur Folge. Durch Verengung oder Verklausung von Durchlässen (z. B. Brücken) kann es zu Ausuferungen und Überbordungen kommen, die ein hohes Schadenspotential besitzen.

### 3.3 Geschiebemanagement

Flussbauliche Konzepte müssen verschiedensten Ansprüchen genügen. In den dicht besiedelten Talräumen der Alpen hat vor wasserwirtschaftlichen und ökologischen Aspekten der Hochwasserschutz oberste Priorität.

Ein Grundsatz für die Planung und Projektierung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist es u. a. „...*natürliche Möglichkeiten des Hochwasserrückhaltes und der Verbesserung des Geschiebehaushalts [...] zu unterstützen.*“ (Schälchli 2005)

Maßnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushalts können sein (z. B. Grebmayer 2007, Schälchli 2005, Marti & Bezziola 2003):

- Bereitstellung von Flächen für eine eigendynamische Entwicklung
- Uferrückbau, Zulassen von Seitenerosion
- Flussbett-Aufweitung
- Verbesserung der Geschiebedurchgängigkeit an Wehranlagen
- Stauraumspülung
- Räumung von Geschiebe in Auflandungszonen und Wiedereinbringung flussabwärts
- Kontrollierte Geschiebeentnahmen
- Förderung des Geschiebeeintrags aus Wildbächen (z. B. durch Umbau von Rückhaltesperren in Dosiersperren)

„Aus flussbaulicher Sicht wird ein dynamisches Geschiebegleichgewicht angestrebt, wo weder bedeutende Erosionen noch Anlandungen auftreten.“ (Schälchli, 2005).

### 3.4 Erfassung des Geschiebetransports

Um negative Trends im Geschiebehaushalt erkennen und Schadensereignissen vorbeugen zu können ist die Kenntnis der Umlagerungsvorgänge während eines Hochwassers besonders wichtig.

Die Quantifizierung von Ereignisfrachten und Geschiebevolumina ist daher ein Grundbaustein zum Prozessverständnis, gehört aber nach wie vor zu den großen Herausforderungen in der Hydrologie.

*„Da bei der Geschiebemessung die unmittelbar an der bewegten Gerinnesohle transportierten Geschiebekörner erfasst werden, ist die Möglichkeit einer fehlerhaften Interpretation der Ergebnisse ungleich größer als bei der Entnahme von Schwebstoffproben aus dem transportierenden Medium ...“ (DVWK 1992)*

Es gibt in der Praxis eine Reihe von Methoden zur Messung des Geschiebetransports, die von *Turomski et. al, 2008* zusammengefasst werden. Dazu gehören:

- das Auffangen von Geschiebe in Geschiebesammlern,
- die Verfolgung von Tracersteinen,
- das Auffangen sich bewegender Partikel im Bachbett mit mobilen oder fixen Fangkörben,
- die indirekte Erfassung mittels Geophonen.

Der Einsatz von Geschiebesammlern ist nur in kleineren Gerinnen bzw. Wildbächen sinnvoll, da er mit einem großen Aufwand verbunden ist.

Nachteilig bei allen Verfahren ist, dass die Daten nur für einen bestimmten Gerinneabschnitt erfasst werden und keine flächenhafte Aussage möglich ist.

## 4 Lösungsansatz

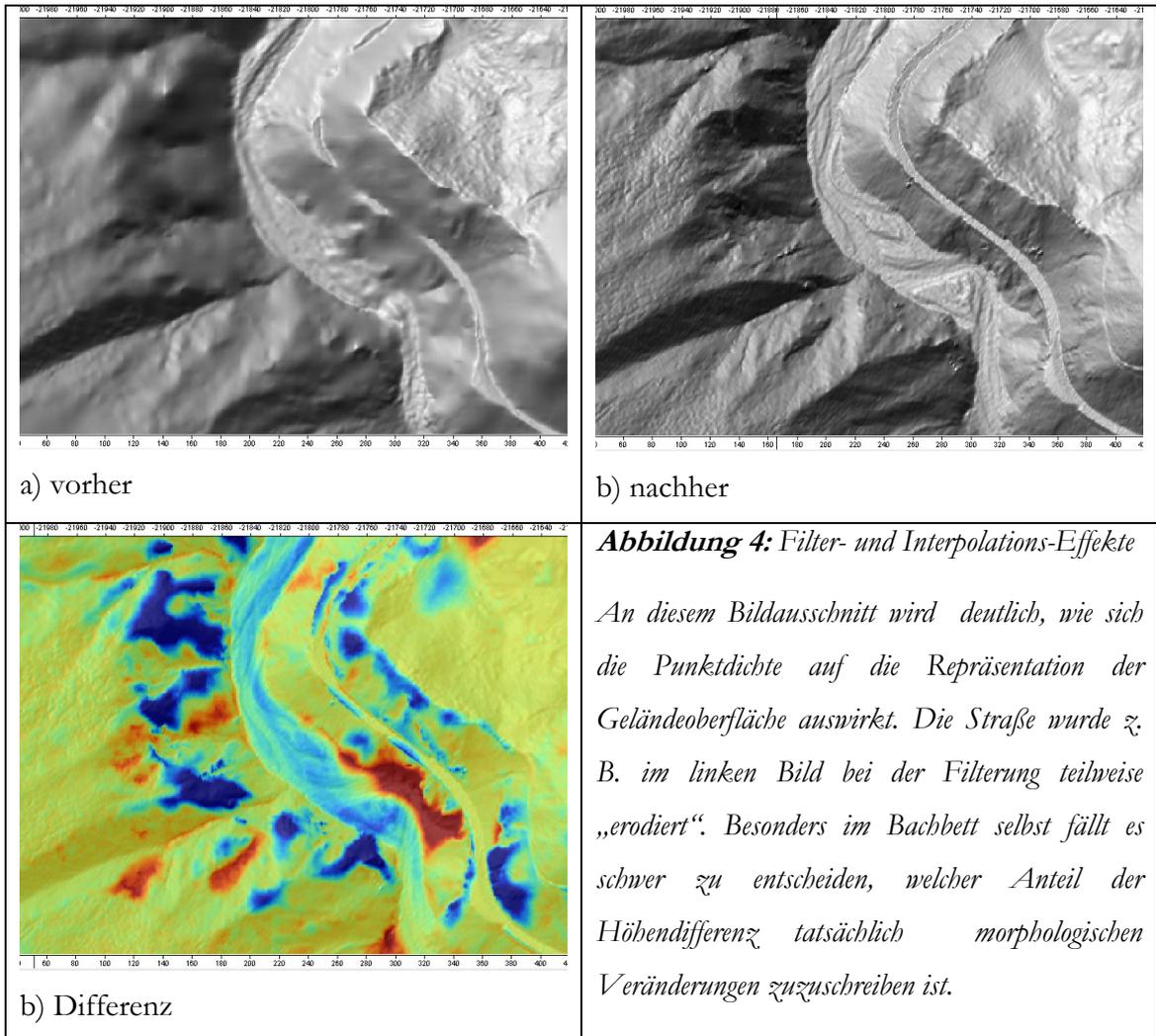
Multitemporale Geländemodelle aus Laserbefliegungen können für die Beobachtung von Geschiebeumlagerungen nach großen Hochwasserereignissen genutzt werden. Dies wurde bereits von *Kessler (2005)*, *Scheidl (2008)* und *Chiari (2008)* in Einzugsgebieten Vorarlbergs und der Schweiz gezeigt.

Die Genauigkeit der volumetrischen Bestimmung hängt jedoch davon ab, wie gut das Gelände durch die Höhenmodelle abgebildet wird. An den waldbestandenen Ufern der Bregenzerach ist die Dichte der Bodenpunkte in Folge der Klassifizierung sehr stark reduziert, was bei der nachfolgenden Interpolation zu unterschiedlichen Ausprägungen der Geländeoberfläche führt (Abb. 4). Die dadurch hervorgerufenen Höhendifferenzen zwischen den Modellen, die nicht durch Veränderungen in der Morphologie erklärbar sind, können kleinräumig durchaus Beträge von 0,5m und mehr annehmen, wie z. B. in Profil 5 (siehe Anhang) zu sehen ist.

Anhand zweier Ausschnitte aus dem Untersuchungsgebiet soll versucht werden, die Größenordnung dieses Fehlers und dessen räumliche Verteilung mit einfachen statistischen Mitteln zu bestimmen.

Dies geschieht zunächst anhand der fertigen Rastermodelle, da die weitere Berechnung der Geschiebevolumina auf diesen Daten aufbaut.

Zum Vergleich werden die Fehler den Ergebnissen einer eigenen Filterung aus den Rohdaten gegenübergestellt, um Aussagen über die Qualität der Filterung machen zu können.



In den nachfolgenden Abschnitten werden die verwendeten Methoden zunächst in der Theorie erläutert. Anschließend wird die konkrete Umsetzung der Datenaufbereitung in LIS-Desktop beschrieben.

## 4.1 Methoden

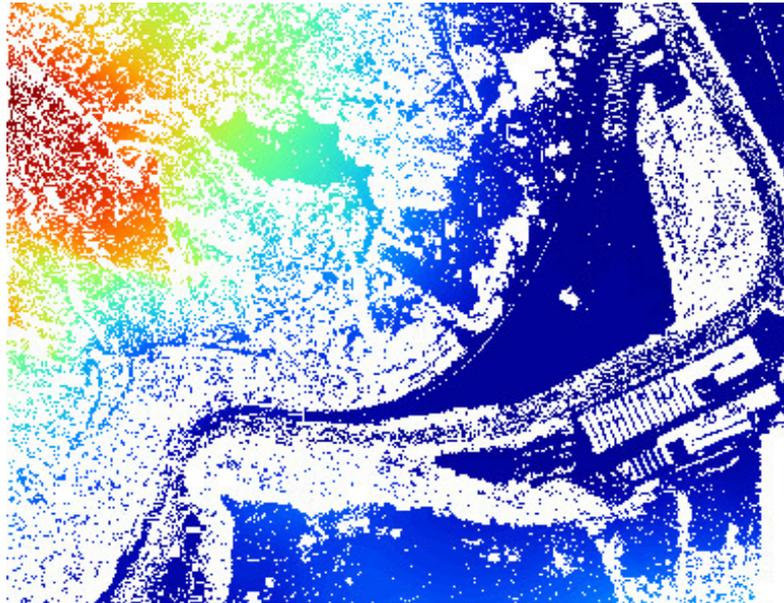
### 4.1.1 Filterung

Für die Klassifizierung der Rohdaten in Boden- und Nicht-Boden-Punkte wurde der von LIS zur Verfügung gestellte Progressive Morphologische Filter nach *Zhang et al. (2002)* verwendet.

Das Konzept der morphologischen Filterung stammt eigentlich aus der Bildverarbeitung und basiert auf Dilation (Ausdehnen) und Erosion (Schrumpfen) von Strukturen. Erosion gefolgt von Dilation wird als Opening - Operation bezeichnet und entfernt kleinere Strukturelemente, während mit der Closing-Operation (zuerst Dilation, danach Erosion) Löcher geschlossen werden.

Das Opening - Konzept wurde von *Kilian (1996)* erstmals auf Laserdaten übertragen und von *Zhang et al. (2003)* durch die Einführung von *increasing window sizes* optimiert. In einem iterativen Prozess werden Opening - Operationen mit zunehmender Größe eines *filter window* durchgeführt, so dass auch Objekte unterschiedlicher Flächenausdehnung erfasst werden können. Nach jeder Opening - Operation wird die Höhendifferenz zwischen der Oberfläche vor und nach dem Filterdurchgang verglichen. Unterschreitet die Höhendifferenz einen bestimmten Grenzwert, wird der Punkt als Geländepunkt interpretiert. Der Grenzwert ist über die Hangneigung definiert.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Hangneigung über die komplette Szene als konstant angenommen wird, was in der Realität selten gegeben ist.



**Abbildung 5:** *Reduzierte Punktdichte nach der Filterung der Rohdaten. Rechts unten sind einige nicht vollständig herausgefilterte große Gebäude zu erkennen*

#### 4.1.2 Interpolation

Als Interpolationsmethode wurde die von *Lee et al. (1997)* entwickelte Multilevel-B-Spline Interpolation gewählt. Die Methode ist in SAGA im Modul *Grid – Spline Interpolation* enthalten und hat gegenüber dem üblicherweise verwendeten Kriging den Vorteil, dass

- a) weniger Parameter bestimmt werden müssen,
- b) sie wesentlich schneller ist,
- c) sie auch auf bereits gerasterte Daten angewendet werden kann. Somit müssen die aus den vorherigen Arbeitsschritten entstandenen Grids nicht zuerst als Punkt-Shapes ausgelesen werden.

B-Splines gehören zu den stark glättenden, deterministischen Interpolatoren und sind gut geeignet, um die Geländeoberfläche realitätsnah wiederzugeben (*Hengl 2009*). Durch die Glättung wird auch das relativ starke Rauschen der Laserdaten abgemildert.

### 4.1.3 Berechnung des Differenzmodells

Durch Subtraktion der z-Werte mit der Formel

$$z_{diff} = z_{voher} - z_{nachher}$$

wird die Höhendifferenz der beiden Geländemodelle berechnet.

Aus der Höhendifferenz kann anschließend das Volumen des verlagerten Geschiebes bestimmt werden.

Negative Werte bedeuten, dass das Gelände bei der Zweitbefliegung höher ist als bei der Erstbefliegung. Somit liegt ein Volumenzugewinn vor. Positive Werte zeigen einen Volumenverlust an.

### 4.1.4 Volumenbilanz

Um die flächenhafte Information in einem zweidimensionalen Diagramm abbilden zu können, wird das Differenzmodell in 500 m-Schritte unterteilt und pro Teilabschnitt das positive (= Austrag) und negative (= Eintrag) Volumen – bezogen auf den *base level* 0 berechnet.

Die Summe aus Ein- und Austrag ergibt das im jeweiligen Streckenabschnitt bewegte Gesamtvolumen, der Anteil, der aus dem betrachteten Gerinneabschnitt ausgetragen wird, wird als Fracht bezeichnet.

## 4.2 Die Daten

Zur Analyse der flussmorphologischen Veränderungen wurden zwei Lasergeländemodelle (DGM) herangezogen, die den Stand vor und nach dem Hochwasserereignis dokumentieren.

Die Geländemodelle wurden

- a) als fertig klassifizierte und interpolierte Rasterdatensätze im Landeskoordinatensystem (GK 28, Bessel 1841) und
- b) als unklassifizierte, WGS84 - referenzierte Rohdaten geliefert.

Um die die Datensätze in den folgenden Ausführungen besser unterscheiden zu können werden die fertigen Rasterdatensätze mit DGM\_g (bzw. DSM\_g) und die mit LIS aus den Rohdaten gefilterten und interpolierten Raster mit DGM\_p (bzw. DSM\_p) abgekürzt.

Daten vor dem Hochwasser (DGM\_gv, DGM\_pv)

Das Land Vorarlberg besitzt ein landesweites Laserhöhenmodell (DGM und DSM) mit einer Rasterauflösung von 1 m. Es wurde im Zeitraum von 2002 – 2005 von der Firma TopScan ([www.topscan.de](http://www.topscan.de)) in mehreren Kampagnen befliegen. Die das Untersuchungsgebiet betreffenden Messungen fanden in den Jahren 2003/2004 statt, der Befliegungszeitraum erstreckte sich aufgrund der großen Höhenunterschiede im Einzugsgebiet von Mitte Mai bis August. Wegen der Schneebedeckung muss für Hochlagen ein später Befliegungszeitpunkt gewählt werden, was jedoch zur Folge hat, dass die Belaubung in tieferen Lagen dann schon sehr weit fortgeschritten ist und die Laserstrahlen die Vegetation nur noch schwer durchdringen können (Rieger et al. 2005).

Für das Landesmodell ist eine Punktdichte von ca. 1 Punkt /m<sup>2</sup> und eine mittlere Höhengenaugkeit von +/- 30 cm dokumentiert ([www.vogis.at](http://www.vogis.at)).

## Nachbefliegung (DGM\_gn. DGM\_pn)

Wenige Monate nach dem Hochwasserereignis wurde mit der Nachbefliegung der am stärksten betroffenen Regionen Vorarlbergs (vor allem entlang der Flussläufe) begonnen. Die Aufnahmen wurden im November / Dezember 2005 gestartet, Teilbereiche konnten aber erst im Juni 2006 befliegen werden, also erst fast ein Jahr nach dem Hochwasserereignis. Das Untersuchungsgebiet fällt fast zur Gänze in diesen Bereich. Diese Tatsache hat auf die Auswertung der Differenzmodelle zweierlei Auswirkungen:

- a) Viele Schäden, besonders im Uferbereich (Uferanrisse, Schäden an Verbauungen, Brücken, Straßen etc. sind nicht mehr in diesem Datenbestand dokumentiert und somit auch nicht quantifizierbar.
- b) Aufgrund der vollen Sommerbelaubung (die Auwälder entlang der Ach sind i. d. R. Laubwälder) ist der Durchdringungsgrad der Vegetation denkbar schlecht. Dieser Umstand wird nur bis zu einem gewissen Grad durch eine höhere Punktdichte bei der Erfassung kompensiert ( $> 1$  Punkt/m<sup>2</sup>).

Ergänzend zu den Raster-Geländemodellen stand noch ein Orthophoto zur Verfügung, das unmittelbar nach dem Ereignis aufgenommen wurde und zur Abgrenzung der zu untersuchenden Flussstrecke genutzt wurde. Das Orthophoto ist im Landeskoordinatensystem referenziert.

### 4.3 Datenaufbereitung in LIS Desktop

LIS Desktop wird von der Firma Laserdata ([www.laserdata.at](http://www.laserdata.at)) zur Verwaltung und Analyse von Laserdaten entwickelt. Das System verbindet eine PostGIS Datenbank mit der Open Source Software SAGA GIS, welche um einige Werkzeuge zur Verarbeitung und Visualisierung von Laserdaten erweitert wurde. So steht neben den LIS-Modulen auch eine umfangreiche Palette an GIS-Funktionalitäten zur Verfügung.

Alle Rasteroperationen dieser Arbeit wurden ausschließlich mit LIS-Desktop durchgeführt. Die Lizenz enthielt folgende Module:

Modul	Funktion
LIS Modules Aggregate Grid	Aggregation von Punktdaten aus der Datenbank zu einem Grid
LIS Modules Filtering	Progressiver morphologischer Filter nach Zhang (2003)
LIS Modules Profile	Extraktion von Profilen aus der Punktwolke
LIS Modules Tools	Berechnung des Extent von ASCII-oder LAS-Files als Polygon
LIS Server Admin	Datenbank-Verwaltungsfunktionen
LIS Server Export	Export der Laserdaten aus der Datenbank als Punktshapes bzw. Tabelle
LIS Server Import	Import der Laserdaten aus ASCII- oder LAS-Dateien

**Tabelle 1:** Die verwendeten LIS Module

### 4.3.1 Gebietsabgrenzung

Um die zu verarbeitenden Datenmengen in Grenzen zu halten, wurde der betroffene Gerinneabschnitt (Flussbett und angrenzende Uferbereiche) zunächst anhand des Orthophotos digitalisiert. Das Flusspolygon wurde entlang der 50.000er-Blattschnittgrenzen in Teilpolygone zerlegt und anschließend aus dem Landeskoordinatensystem in das Koordinatensystem der Rohdaten (UTM 32) transformiert.

### 4.3.2 Import der Laserdaten

Die Laserdaten sind in Flugstreifen organisiert und liegen als header-freie ASCII-Textfiles im Koordinatensystem UTM 32 vor.

In fünf Spalten sind folgende Attributwerte gespeichert:

GPS-SOW (seconds of week), UTM-Rechtswert (X), UTM-Hochwert (Y), UTM-Höhe (Z) und Intensität.

```
31265.000187 32572541.05 5242827.32 1004.66 255
31265.000211 32572540.70 5242826.92 1004.47 255
31265.000235 32572540.43 5242826.67 1005.32 255
31265.000259 32572540.22 5242826.55 1007.24 7
31265.000283 32572539.92 5242826.25 1007.63 28
31265.000306 32572539.67 5242826.02 1008.46 13
31265.000330 32572539.37 5242825.67 1008.40 243
```

**Abbildung. 6:** *Auszug aus einem ASCII-File*

Pro Flugstreifen gibt es je eine Datei für first-pulses (.alf) und last-pulses (.all).

Der Rechtswert ist mit der Nummer der UTM – Zone (hier 32) codiert.

Um Projektionsprobleme zu vermeiden, müssen die ersten beiden Nummern der X-Spalte (in Abb. 6 rot markiert) abgeschnitten werden.

Dies wurde automatisiert mit Hilfe des frei verfügbaren Stream-Editors sed (<http://gnuwin32.sourceforge.net/packages/sed.htm>) über die Kommando-zeile abgewickelt.

Um die ASCII-Files in die PostGIS-Datenbank einlesen zu können, muss zuerst mit dem Modul *LIS SERVER Admin > Create New LIDAR Point Project* ein neues Projekt mit Namen und Extent angelegt werden.

Dann kann mit *LIS SERVER Import > Import LIDAR Points from ASCII file* das Einlesen der Daten beginnen. Im Sinne der Verarbeitungsgeschwindigkeit empfiehlt es sich, beim Import größerer Datenmengen im Dialogfeld die Option *Update LIDAR Point Project* zu deaktivieren und diesen Schritt erst zum Schluss mit dem dafür vorgesehenen Modul durchzuführen.

Im aktuellen Projekt wurden nur die .all-Dateien (last pulses) verwendet.

### 4.3.3 Aggregierung der Raster aus der Punktwolke

Aus dem Point Project wurden die Laserdaten mit *LIS MODULES > Aggregate LIDAR Points to Grid* aggregiert. Hierbei erhält jede Rasterzelle den mittels einer Aggregierungsfunktion aus der Punktwolke extrahierten Wert. Dieser wird in der Datenbank berechnet und in ein Raster (SAGA-Grid) geschrieben. Als Funktionen stehen z. B. zur Verfügung: n (Anzahl), max, min, mean, standard deviation und einige weitere statistische Funktionen (siehe auch LIS - Dokumentation).

Für das Geländemodell wurden die tiefsten Werte (min) aus der Punktwolke der last pulses extrahiert.

Die Rasterweite des Grids wurde auf 1 m festgelegt, die digitalisierten Flusspolygone (siehe 6.1.1) dienten zur Abgrenzung des *Extent*.

### 4.3.4 Filterung

Die Filterung erfolgte mit dem bereits in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen progressiven morphologischen Filter nach *Zhang (2002)*, der als LIS-Modul von zur Verfügung stand.

Der Filter besitzt eine Reihe von „Stell-Schrauben“, mit denen er an die gebietstypischen Geländebeziehungen angepasst werden kann:

- a) **Number of Steps:** Hier kann die Anzahl der Filterdurchläufe geregelt werden. Bei jedem Durchlauf wird das *filter window* um eine bestimmte Anzahl an Pixeln vergrößert, siehe e). Die Endgröße des *filter window* muss etwas größer sein als das größte Objekt, das entfernt werden soll. Da in den untersuchten Gebieten sehr große Gebäude selten vorkommen, reichen 8 bis 11 Durchläufe bei einer linearen Öffnung des *filter window* aus, was einer maximalen Größe von 23 Pixeln entspricht. Ist das *filter window* zu groß, werden Geländeformen wie z. B. Kuppen und Gipfel abgeschnitten.
- b) **Initial threshold dz und Maximum threshold dz:** Diese zwei Grenzwerte bestimmen, ab welcher Höhendifferenz ein abrupter Höhengsprung als Objekt oder als Gelände interpretiert wird. Der *initial threshold* sollte deshalb in etwa der Höhenggenauigkeit der Laserdaten (meist zwischen 0,2 und 0,3m) entsprechen. Zhang empfiehlt zur Filterung von Gebäudekomplexen, den *maximum threshold* auf die Höhe des niedrigsten Gebäudes einzustellen. Im reliefierten Gelände kann der Wert mit der größten Höhendifferenz im Gebiet gleichgesetzt werden.
- c) **Terrain slope:** Hier wird die mittlere bzw. vorherrschende Hangneigung festgelegt. Dies ist vor allem in komplexen Szenen ein sehr sensibler Parameter. Um Bäume aus Steilhängen herausfiltern zu können, muss der terrain slope hoch angesetzt werden, was in ebenen Lagen dazu führt, dass z. B. Dämme und Grabenstrukturen stark zersetzt werden. Umgekehrt wird bei einem niedrigen terrain slope der Wald aus Hangbereichen oder an steilen Böschungen nicht vollständig entfernt.

Eine optimale Einstellung gibt es hier nicht, die beste Lösung erarbeitet man sich am besten durch Ausprobieren.

Notfalls muss eine komplexe Szene geteilt und nach homogenen Bereichen getrennt gefiltert werden.

- d) **Increase window size und Base of the window:** Legt die Größe des initialen *filter window* fest sowie die Öffnungsrate (linear oder exponentiell). Auch diese Parameter müssen bestmöglich an die Szene angepasst werden und orientieren sich z. B. an der Größe von Objekten, die entfernt werden

müssen. In allen getesteten Fällen brachte die Kombination linear / 1 die besten Ergebnisse.

Als Output der Filterung werden 4 Raster erzeugt:

Ground, Nonground, Filter Surface und Iteration. Das Ground-Grid wird zum DGM weiterverarbeitet. Aus dem Iteration-Grid ist abzulesen, welcher Punkt bei welchem Filterdurchlauf entfernt wurde.

### 4.3.5 Interpolation

Die Interpolation der durch die Filterung stark ausgedünnten Wald- und Siedlungsflächen wurde mit Hilfe des Moduls *Grid – Spline Interpolation > Multilevel B-Spline Interpolation (from Grid)* durchgeführt. Es wurden die Default-Einstellungen übernommen:

Method	With B-spline refinement
Threshold Error	0.0001
Maximum level	11

### 4.3.6 Differenz und Volumenberechnung

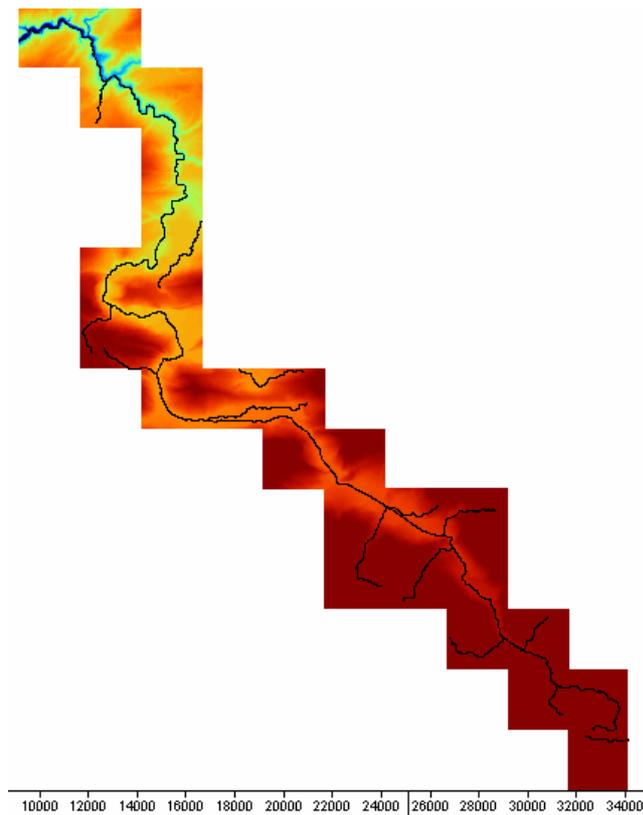
Die Differenzbildung erfolgte mit dem Tool *Grid – Calculus > Grid Calculator*.

Ebenfalls im *Grid – Calculus*-Modul steckt die Funktion *Grid Volume* zur Berechnung des Grid-Volumens oberhalb und unterhalb eines definierbaren *base level*. Der base level wurde auf den Wert 0 gesetzt, d. h. es wird davon ausgegangen, dass zwischen den Geländemodellen keine systematische Höhendifferenz existiert. Dass dies nicht überall in gleichem Maß zutrifft, wird in Abschnitt 6.1 noch näher diskutiert.

### 4.3.7 Ableitung des Gerinneprofils

Die Profillinie dient zur Darstellung des Gerinne-Längsprofils und bildet das ‘‘Rückgrat‘‘ für die Unterteilung des Flusslaufes in 500 m Streckenabschnitte für das Geschiebebilanz - Diagramm. Die Linie wurde mit Hilfe eines channel network erzeugt. Um die Ableitung des *channel network* (*Terrain Analysis > Channels*) zu beschleunigen bzw. erst zu ermöglichen, wurde die Auflösung des Modells auf 5m herabgesetzt (*Grid - Tools > Resampling*). Danach wurde mit *Terrain Analysis – Preprocessing > Fill Sinks* ein hydrologisch korrektes DGM berechnet. Als *Initiation Grid* wurde die *Strabler Order* verwendet.

Das *channel network* wird sowohl als Raster- als auch als Vektordatensatz generiert. Aus dem Vektordatensatz lässt sich leicht mit Hilfe des Werkzeugs *Terrain Analysis – Profiles > Profiles from Lines* ein Gerinne-Längsprofil darstellen.



**Abbildung 7:** Höbencodiertes (5 m) Geländemodell des Mittellaufs mit dem daraus abgeleiteten channel network

## 5 Projektbeschreibung

### 5.1 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Das Einzugsgebiet der Bregenzerach wurde aus mehreren Gründen für die Durchführung der Geschiebebilanz verwendet:

- Datenlage: für das gesamte Einzugsgebiet liegen zwei Laserdatensätze vor, die für eine multitemporale Auswertung genutzt werden können;
- Hochwasserereignis: die Bregenzerach war von dem Hochwasserereignis vom August 2005 besonders stark betroffen, dabei wurden auch sehr große Geschiebemengen mobilisiert;
- Der Feststoffhaushalt der Bregenzerach war in den letzten 10 Jahren Gegenstand zweier Studien (*Küing 2000, Rudhardt 2004*). Die von (*Rudhardt 2005*) in diesem Zusammenhang durchgeführte Geschiebmodellierung eignet sich als Referenz für die Überprüfung der Ergebnisse.

### 5.2 Das Untersuchungsgebiet

Die Bregenzerach ist ein typischer Geschiebe führender Gebirgsfluss in Vorarlberg mit einer Einzugsgebietsfläche von 832 km<sup>2</sup> (*Rudhardt 2005*) und einer Länge von ca. 60 km. Die Ach entspringt im Lechquellengebirge in einer Höhe von 2400 m ü. A. Sie entwässert auf ihrem Weg Richtung Nordwesten große Teile des Bregenzerwaldes und mündet bei Bregenz auf einer Höhe von 395 m ü. A. in den Bodensee.

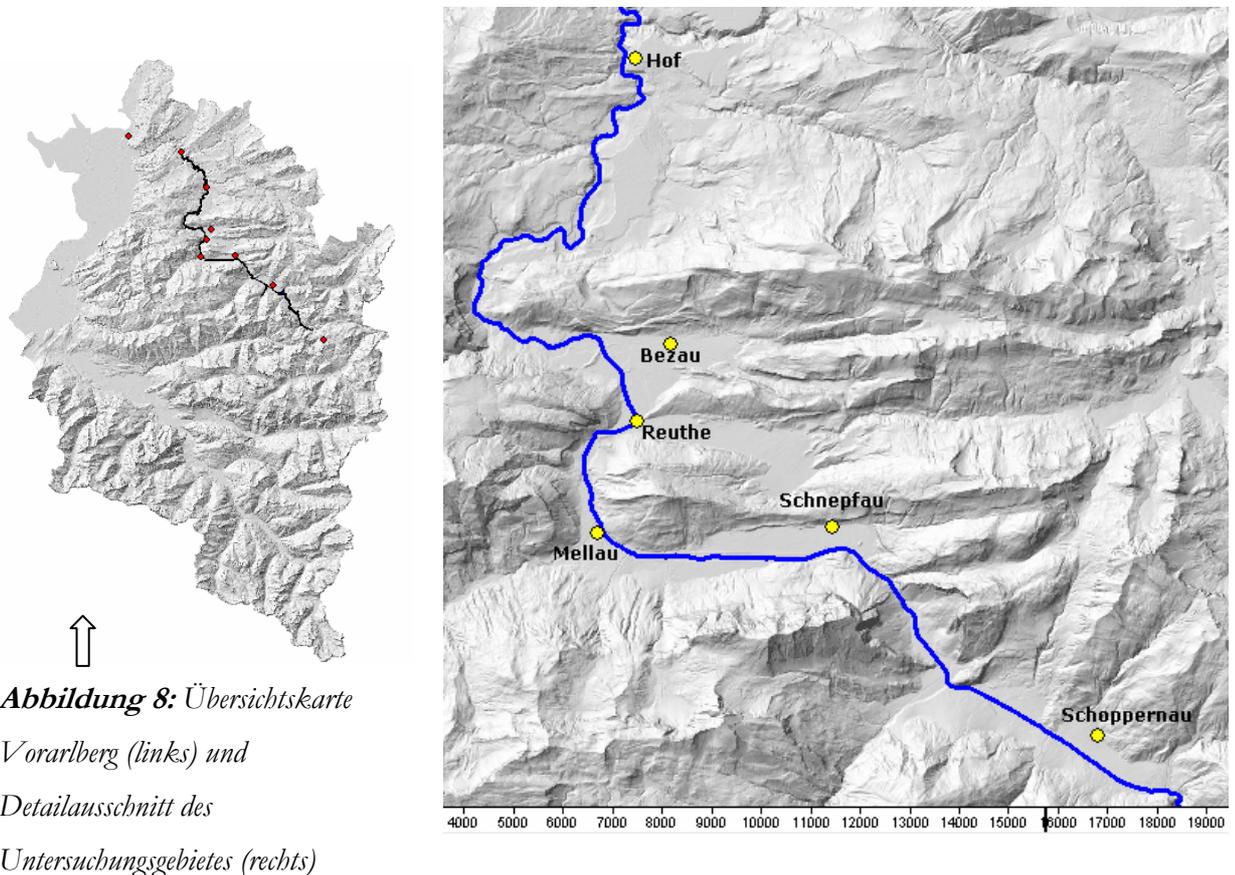
Einen umfassenden Überblick über das Einzugsgebiet kann man sich bei *Perthl et al. (2004)* verschaffen.

Im Oberlauf bis zur Einmündung des Schrecksbaches bei Schoppernau (km 54) weist die Bregenzerach einen ausgeprägten Wildbachcharakter auf.

78 % des Höhenunterschieds von gut 2000 Höhenmetern werden in dieser ca. 10 km langen Oberlaufstrecke überwunden (siehe Gerinne-Längsprofil), was mit einer entsprechend starken Geschiebeführung einhergeht (*Rudhardt 2005*).

Der Mittellauf bis etwa zur Einmündung des Schmiedebaches nahe der Ortschaft Egg (km 24) zeichnet sich durch ein mittleres Gefälle von 1% und eine überwiegend flache Sohle aus, die im Bereich von Siedlungen stark verbaut ist.

Etwa ab der Einmündung des Schmiedebachs folgt der Flusslauf einer längeren Schluchtstrecke, die sich bei Kennelbach zur Rheinebene hin öffnet. Im Bodensee bildet die Bregenzerach ein ausgeprägtes Delta.



**Abbildung 8:** Übersichtskarte Vorarlberg (links) und Detailausschnitt des Untersuchungsgebietes (rechts)

Die nachfolgenden Untersuchungen beschränken sich auf den Gerinne-Abschnitt zwischen Schoppernau (km 51) und dem Beginn der Schluchtstrecke bei Egg (km 23,5) und umfassen somit eine Strecke von ca. 27 km. Im Verlauf dieses Gerinneabschnitts münden rechtsufrig Schrecksbach, Schrankenbach, Rehmerbach, Weißbach, Bizauerbach, Grebenbach und Schmiedebach und linksufrig Dürrenbach (Au), Argenbach, Dürrenbach (Mellau), Mellenbach, und Rotenbach sowie zahlreiche kleinere Wildbäche.

Die Eckdaten zum Geschiebehalt sind der Studie von *Rudhardt et al. (2005)* entnommen. Demnach transportiert die Bregenzerach in Durchschnittsjahren ca. 7.000 m<sup>3</sup> Geschiebe in ihr Delta, bei einem HQ 100 sind es 10.000 m<sup>3</sup>.

Der Geschiebeeintrag aus den Zubringern bewegt sich in der Größenordnung von 20.000 m<sup>3</sup> in Durchschnittsjahren und 65.000 m<sup>3</sup> in extremen Jahren.

Die Angaben zum Geschiebeeintrag differieren jedoch, *Küng (2000)* schätzte die Geschiebemengen aus den Zubringern in Ober- und Mittellauf bis Mellau mit ca. 100.000 m<sup>3</sup> deutlich höher an (Tabelle 2).

Gewässer	Geschiebefracht (m <sup>3</sup> /a)	Auffangwerke (m <sup>3</sup> )	Entnahme Gewerbe (m <sup>3</sup> )	Eintrag oberhalb Au (m <sup>3</sup> )	Eintrag Au bis Mellau (m <sup>3</sup> )
<b>Linke Seite</b>					
Schendelstobel	1.000			1.000	
Sennauerbach	600			600	
Dürrenbach (Au)	30.000	5.000	5.000	25.000	
Argenbach	7.000	1.000	500	6.500	
Alpbach	3.000				3.000
Dürrenbach (Mellau)	20.000	5.000	5.000		15.000
Mellenbach	30.000		3.000		27.000
Fluhbach	700	20.000	200		500
<b>Rechte Seite</b>					
Eggenbach	300			300	
Seebach	500			500	
Hopfrebenbach	1.000			1.000	
Schrecksbach	25.000	3.000	3.000	22.000	
Schranzenbach	1.000	30.000	1.000		
Rehmerbach	1.000	1.500	500	500	
Weißbach	300				300
Höllbach	500	500	500		
Ulfernbach	500		400		
Bizauerbach	2.000	50.000	1.500		
Rimsbach	400				
Simonsbach	1.000	500			
<b>Summe</b>	<b>125.800</b>		<b>20.600</b>	<b>57.400</b>	<b>45.800</b>

**Tabelle 2:** Geschätzte, jährliche Geschiebefracht aus den Seitengewässern bis Mellau (nach Küng 2000)

Die flachen, ehemals furkierenden Talstrecken zwischen Schoppernau und Au sowie der Abschnitt Schnepfau – Mellau sind durch Siedlungstätigkeit und landwirtschaftliche Nutzung stark eingeengt. Nur in den wenigen breiten bzw. aufgeweiteten Flussabschnitten des Mittellaufs können noch Umlagerungsprozesse stattfinden (*Rudhardt 2005*).

Flussabwärts von Schnepfau wurde die Ach in den 50er und 60er Jahren mittels Quer- und Längsbauten fixiert, um den Talboden vor Überschwemmungen zu

schützen. Als Folge davon kam es zu Eintiefungen von bis zu 3 Metern (*Bundesamt für Wasserversorgung 2009*).

In einem Pilotversuch wurde 1996 damit begonnen, einen 1,8 km langen Streckenabschnitt aufzuweiten. Seitdem kann eine kontinuierliche Hebung der Gewässersohle beobachtet werden, die noch nicht abgeschlossen ist.

Auch der weitere Verlauf von Mellau bis Bezau ist durch Regulierungsbauwerke, Böschungssicherungen und Dämme beeinträchtigt. Hier verhindern Wehre und Sohlrampen die Sohleintiefung.

An der Wasserfassung Bezau wird ein großer Teil des Wassers der Bregenzerach zur Energiegewinnung in den Stauweiher Andelsbuch ausgeleitet (*Parthl et al., 2004*).

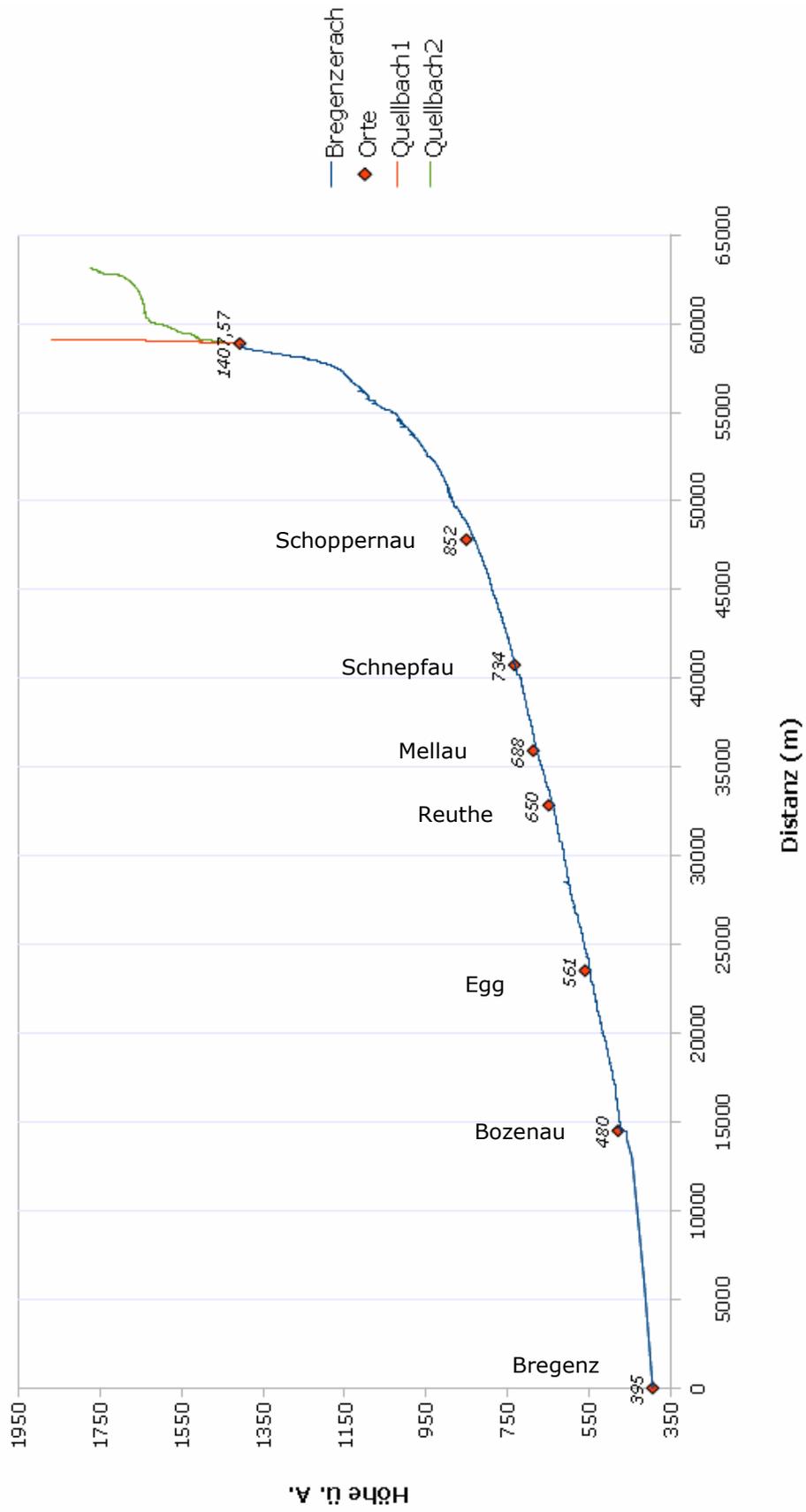


Abbildung 9: Gerinne-Längsprofil

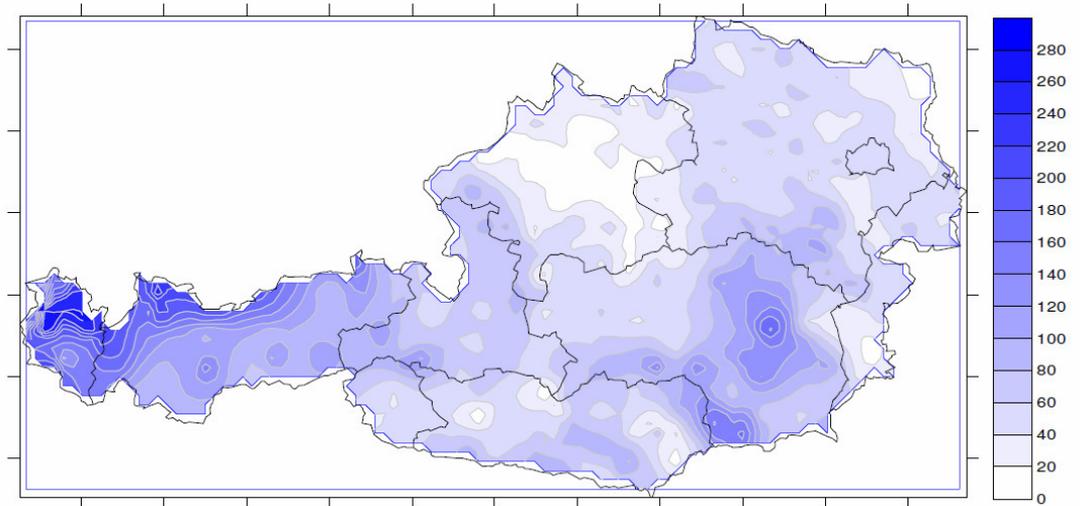
### 5.3 Das Hochwasserereignis im August 2005

In der Nacht vom 22. auf den 23. August führten im nördlichen Alpenraum anhaltende Niederschläge hoher Intensitäten (bis zu 10 mm/h über mehrere Stunden hinweg) zu extremen Spitzenabflüssen. Die Niederschläge im Bereich eines sich nur langsam nach Norden verlagernden Tiefs bzw. einer Okklusion über Westösterreich, Teilen der Schweiz und dem südlichen Bayern wurden durch gleichzeitig stattfindende Hebungsprozesse im Stau der Alpen und eine kräftige Nordanströmung verstärkt. Eine dem Ereignis vorausgehende Vb-ähnliche Wetterlage hatte in den Tagen zuvor im gesamten Alpenraum zu einer hohen Vorsättigung der Böden geführt (*BMLFUW 2006*).

Dadurch bauten sich die Hochwasserwellen sehr schnell auf, die Abflüsse überstiegen regional das 500-jährliche Hochwasserereignis. Ein weiterer Grund für die starke und lang andauernde Reaktion einiger Vorfluter auf das Ereignis war neben der langen Regendauer (z. T. 30 Stunden ohne Unterbrechung) auch die flächenhafte Überregnung ganzer Einzugsgebiete (*BMLFUW 2006*).

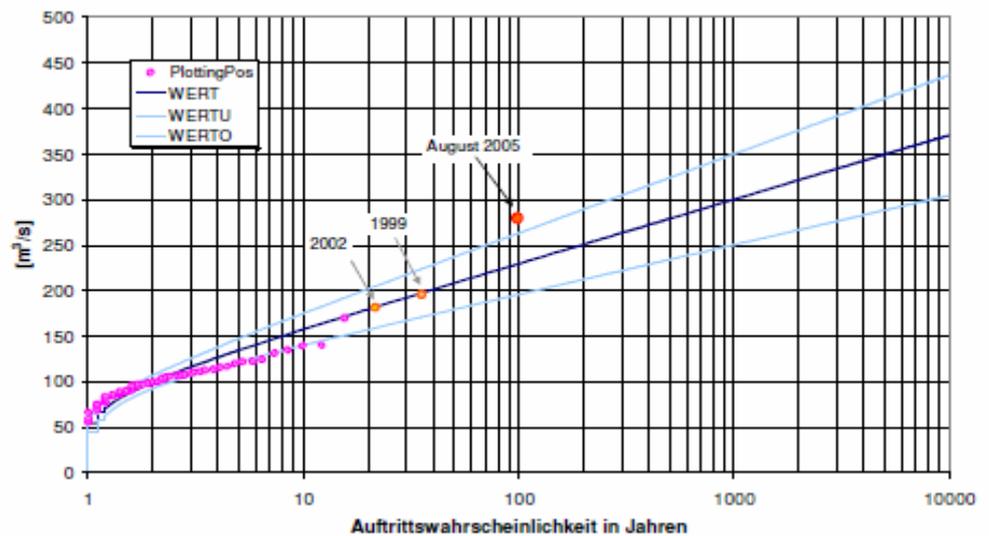
Abbildung 10 zeigt die Niederschlagssummen für den Zeitraum vom 19. bis 24. August 2005. Auf der Karte ist deutlich der Niederschlagsschwerpunkt über Vorarlberg und dem nordwestlichen Tirol sowie ein weiteres Maximum über dem Südosten der Steiermark zu sehen. An einigen Messstationen im Bregenzerwald wurden Tagesniederschlagssummen (24h) von 160 mm bis > 200 mm registriert. Somit wurde regional eine Jährlichkeit des Niederschlags von 100 überschritten.

Das Frequenzdiagramm der Bregenzerach am Pegel Au (Abb. 11) zeigt, dass die Hochwasserspitze als ein sehr seltenes Ereignis eingeschätzt wird.



**Abbildung 10:** Niederschlagssummen vom 19. – 24. August 2005

Quelle: BMLFUW 2006



**Abbildung 11:** Frequenzdiagramm für den Pegel Au / Bregenzerach

Quelle: BMLFUW 2006

Entlang der Bregenzerach waren die größten Schäden im Abschnitt zwischen Schnepfau und Reuthe zu verzeichnen. Die Bilanz: Auf einer Überflutungsfläche von insgesamt ca. 1,6  $\text{km}^2$  wurden zahlreiche Gebäude, Straßen und Wege beschädigt oder zerstört. Bei Bezau brach ein Damm, das dahinter liegende Gewerbe- und Siedlungsgebiet stand stellenweise 4m unter Wasser.

Allein an der Bregenzerwaldstraße belief sich der Schaden auf ca. 3,6 Mio. Euro, die Schäden durch Uferanrisse, an Verbauungen, Brücken und der Gewässersohle werden auf insgesamt 3,8 Mio. Euro geschätzt (*Amt der Vorarlberger Landesregierung 2005*).

Es wurden extrem hohe Geschiebemengen mobilisiert, zum Teil aus den Zubringern, aber auch durch massive Ufer- und Sohlerosion sowie Nachböschung nach Unterschneidung in der Bregenzerach selbst.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Explorative Datenanalyse

Ziel der statistischen Auswertung ist es herauszufinden, in welchem Maß die Punktdichte die Genauigkeit der Volumenberechnung beeinflusst. Eine Bewertung der absoluten Genauigkeit kann mangels Referenzdaten (z. B. aus terrestrischer Vermessung) an dieser Stelle nicht durchgeführt werden.

Die von *Scheidl (2008)* vorgeschlagene Methode der Genauigkeitsberechnung mittels Pseudo-Kontrollpunkten aus Oberflächenmodellen ist hier nicht durchführbar, da solche Punkte im Wald praktisch nicht zu lokalisieren sind.

Es bleibt deshalb lediglich ein relativer Vergleich der beiden Geländemodelle übrig.

Die Abschätzung des Fehlers wurde mit einfachen statistischen Methoden anhand zweier Testgebiete durchgeführt. Diese sollten von den morphologischen Veränderungen durch das Hochwasserereignis bzw. offensichtlichen anthropogenen Veränderungen nicht betroffen sein (Kontrolle am Orthophoto), jedoch ähnliche Geländebeziehungen und ein vergleichbares Vegetationsspektrum besitzen, weshalb die Hochlagen ebenfalls aus der Berechnung ausgeschlossen wurden.

**Testgebiet 1** liegt im unteren Mittellauf. Auf den Flussterrassen ist der Waldanteil eher gering und konzentriert sich hauptsächlich auf die dort sehr breite und flache Flussaue. Außer den Häusern der Siedlungen Bezaun und Reuthe befinden sich einige sehr große Gebäude zweier Gewerbegebiete in der Fläche.

**Testgebiet 2** befindet sich flussaufwärts bei Schoppernau, am oberen Ende des Untersuchungsgebietes. Es umfasst u. a. die Murkegel des Schrecksbaches und des Dürrenbaches und ist charakterisiert durch einen hohen Waldanteil (ca. 50% der Fläche).

Die Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung wurden getrennt nach Wald/Siedlung (= nonground) und offenen Flächen (= ground) auf Grundlage

- a) der Differenzen aus DGM\_gv und DGM\_gn (DGM\_gdiff) sowie
- b) der Differenzen aus DGM\_pv und DGM\_pn (DGM\_pdiff, nur für Testgebiet 2)

berechnet.

Die räumliche Verteilung der Differenzen (Abb. 12 und 13) zeigt, dass die größten Unterschiede erwartungsgemäß dort zu finden sind, wo im Wald und in Siedlungen die Punktdichte gering ist.

Im Testgebiet 1 liegen die größten Differenzen bei -15,94 m bzw. +22,57 m. Diese Extremwerte sind dabei im sehr steilen Waldgelände im SW des Ausschnitts sowie im Bereich der großen Gebäude im NW und S des Testgebietes lokalisiert. Der Flächenanteil der großen Abweichungen über 10m bzw. unter -10m liegt allerdings nur bei 0,06 %.

Das arithmetische Mittel des gesamten Differenzmodells beträgt 0,023 m bei einer Standardabweichung von +/-0,56 m.

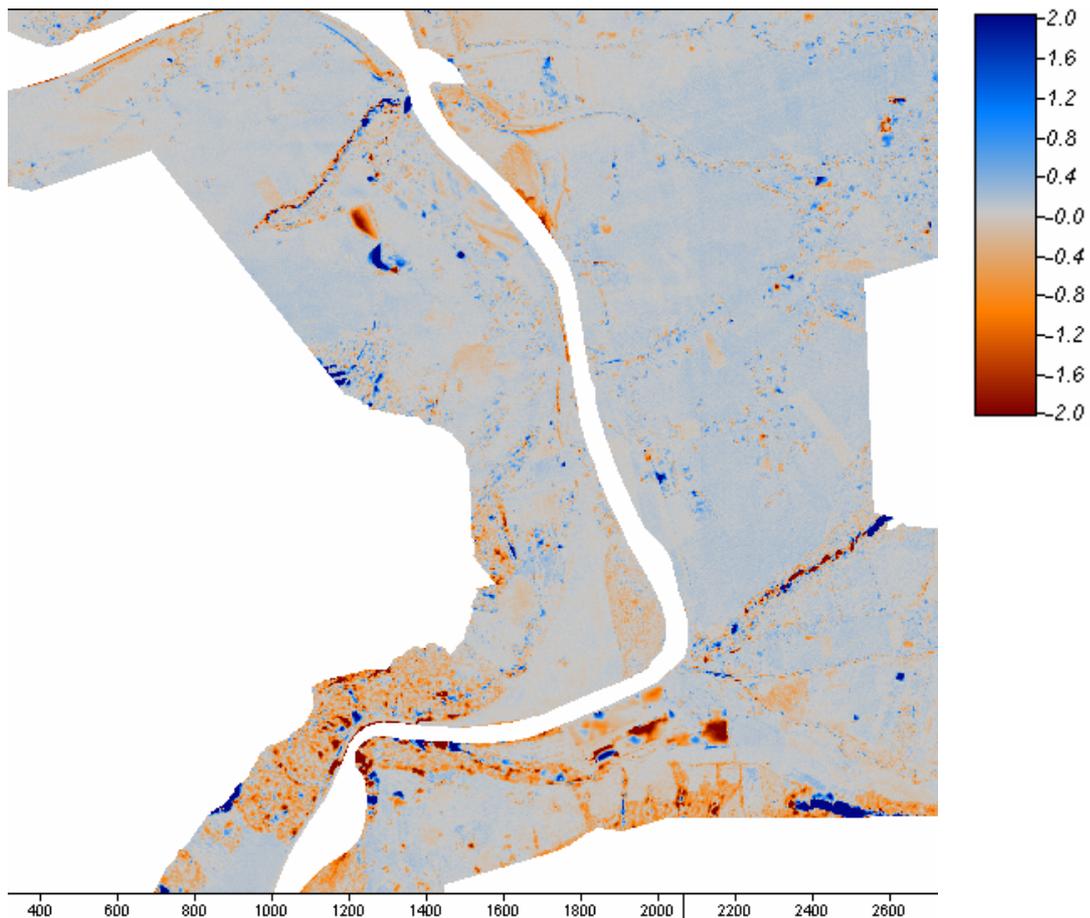
Im freien Gelände verteilen sich 68,3 % aller Differenzen auf einen Wertebereich von -0,24 m bis + 0,32 m, der Schwerpunkt der Abweichungen ist leicht positiv.

Die Differenzen in den nonground - Arealen liegen im Mittel nahe bei 0, haben jedoch einen etwas größeren Schwankungsbereich von -0,57 m bis + 0,55 m.

Die Kennwerte für das Differenz-Grid aus Testgebiet 1 sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

<b>Zone</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>MW</b>	<b>Stdabw</b>
1 (non-ground)	-15,94	22,57	-0,01	0,56
2 (ground)	-14,40	22,17	0,04	0,28
1 + 2 (gesamt)	-15,94	22,57	0,01	0,97

***Tabelle 3:*** Statistische Kennwerte für das Testgebiet 1

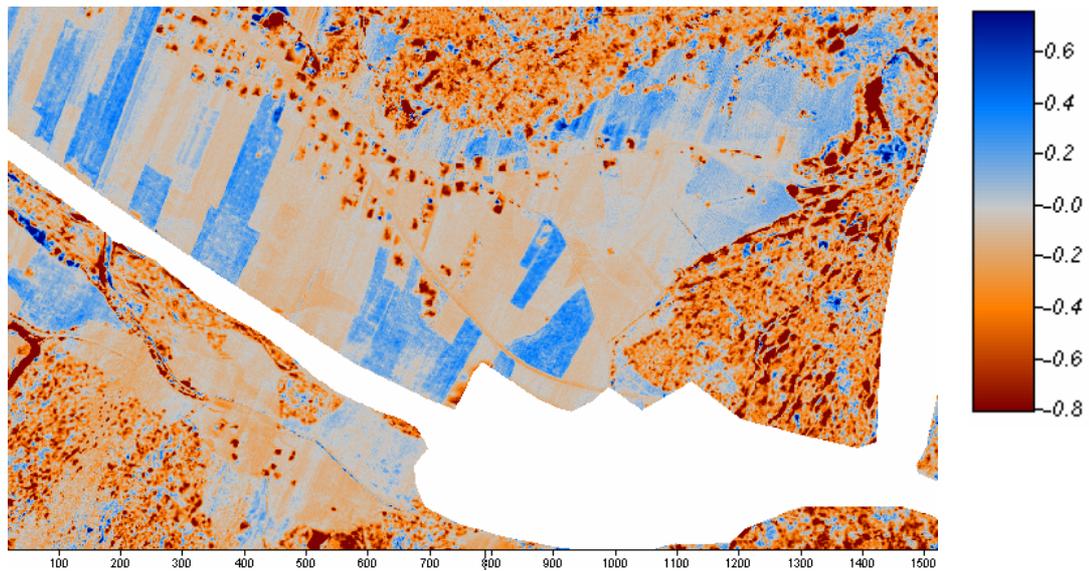


**Abbildung 12:** Differenz-Grid Testgebiet 1

Für das zweite Testgebiet wurde der Mittelwert des Differenz-Grids zu  $-0,15$  m mit einer Standardabweichung von  $0,34$  m bestimmt. In dem betrachteten Ausschnitt liegen also die Höhenwerte der zweiten Befliegung im Mittel um  $15$  cm über den Höhen der ersten Befliegung, im Wald sogar  $21$  cm. Die Werte in der Klasse nonground schwanken jedoch mit  $\pm 0,39$  m weniger stark als im Testgebiet 1. Das kann damit zu tun haben, dass das Gelände im zweiten Testgebiet insgesamt homogenere, geschlossene Flächen aufweist und weniger Siedlung bzw. keine sehr großen Gebäudekomplexe herausgefiltert werden müssen.

Zone	Min	Max	MW	Stdabw
1 (non-ground)	-9,84	2,43	-0,21	0,39
2 (ground)	-6,19	2,81	-0,04	0,19
1 + 2 (gesamt)	-9,84	2,81	-0,15	0,34

**Tabelle 4:** Statistische Kennwerte für das Testgebiet 2



**Abbildung 13:** Ausschnitt aus Differenz-Grid Testgebiet 2

Für Testgebiet 2 wurde die Analyse zusätzlich mit den Raster-Differenzen aus den Rohdaten (DGM\_pdiff) durchgeführt. Die Ergebnisse decken sich gut mit denen der professionellen Filterung.

Die Klassifizierung mit dem morphologischen Filter resultiert in einem Mittelwert für beide Klassen von +0,13 m (+/- 0,31 m).

Zone	Min	Max	MW	Stdabw
1 (non-ground)	-4,26	8,06	0,11	0,19
2 (ground)	-4,61	7,83	0,03	0,29
1 + 2 (gesamt)	-4,61	8,06	0,13	0,31

**Tabelle 5:** Statistische Kennwerte für das Testgebiet 2 ermittelt aus dem DGM\_pdiff

Fazit:

- In den Testgebieten liegen die Differenzen im Mittel zwischen den Geländemodellen noch innerhalb der Höhengenaugkeit von +/- 30 cm.
- In Flächen mit reduzierter Punktdichte (Wald, Siedlung) ist der Fehler größer als auf Freiflächen. Dort ist die Differenz kleiner als 10 cm.
- Die Punktdichte ist abhängig vom verwendeten Filter, von den Gebietscharakteristika (Anteil Wald, Siedlung, offene Wasserflächen etc.), vom Durchdringungsgrad der Vegetation (Befliegungszeitpunkt, Waldtyp (Hollaus 2006)).

Daraus folgt, dass die Differenzen lokal sehr stark variieren. Um den Einfluss der Punktdichte auf die Berechnung des Geschiebevolumens zu quantifizieren, sind die jeweils vor Ort herrschenden Verhältnisse zu beachten.

## 6.2 Geschiebebilanz

Die Ereignisfracht der 500m - Gerinneabschnitte ist in Abb. 14 dargestellt.

Insgesamt wurden auf der untersuchten, 27 km langen Strecke 1,4 Mio. m<sup>3</sup> Geschiebe mobilisiert.

Dabei wurden in Summe 906.560m<sup>3</sup> aufgelandet und 493.640m<sup>3</sup> ausgetragen.

7534m<sup>3</sup> wurden aus dem Oberlauf in den Gerinneabschnitt eingetragen und 4168m<sup>3</sup> aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen. Dies bedeutet, dass der Großteil des Geschiebes in der Gerinnestrecke selbst wieder abgelagert wurde und damit Auflandung und Umlagerung die dominierenden Prozesse bei diesem Ereignis waren.

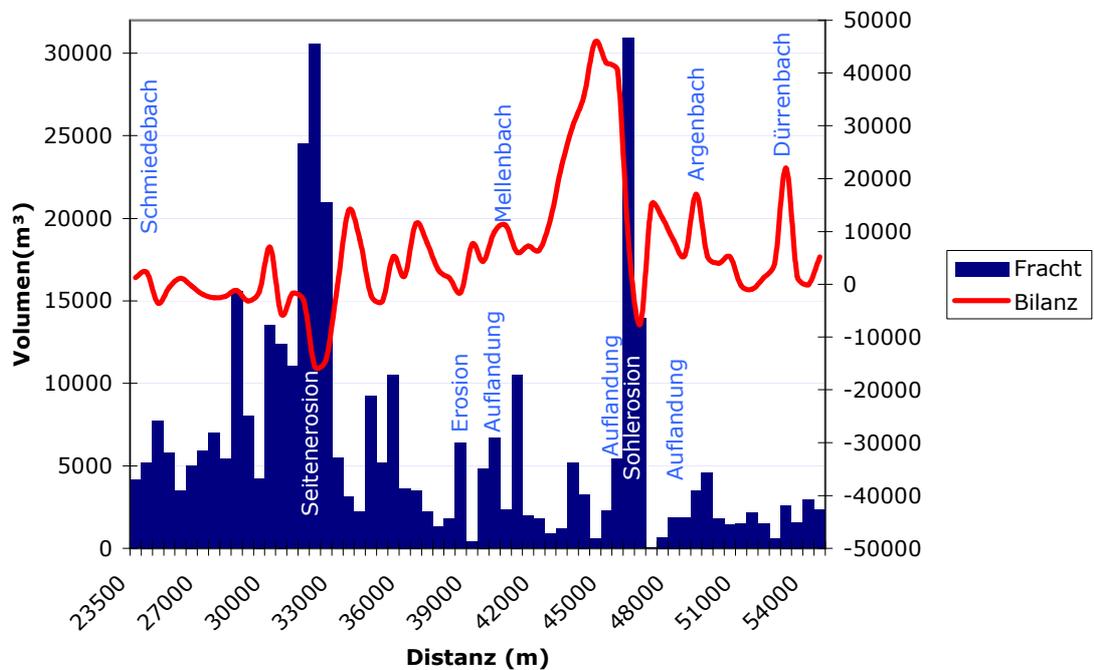
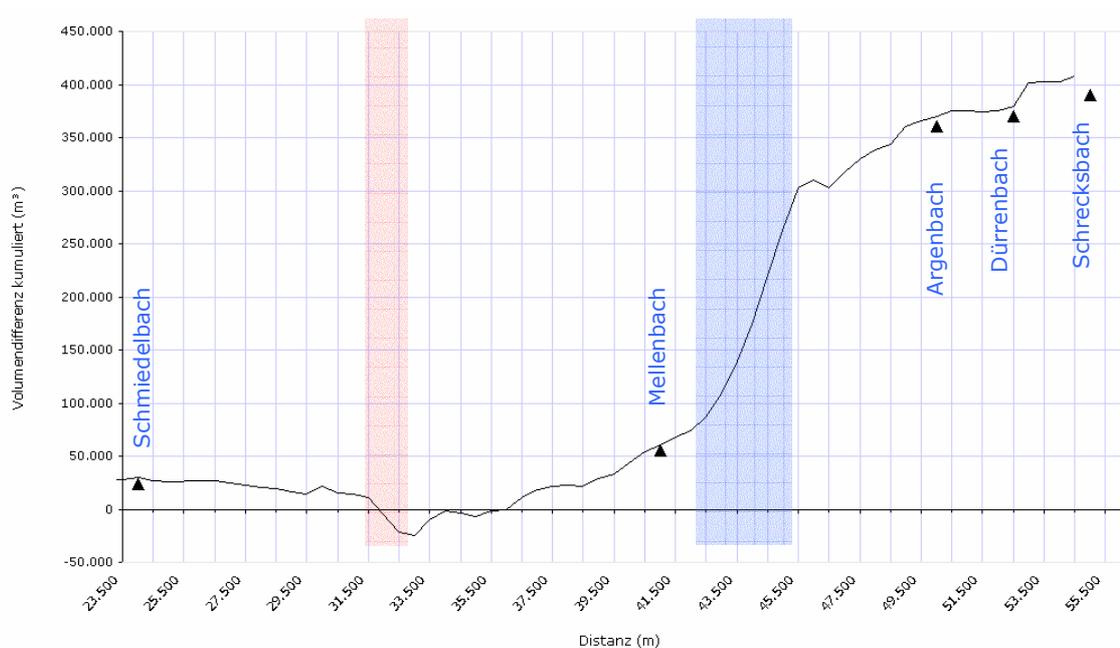


Abbildung 14: Ereignisfracht und Bilanz der Teilstrecken

Bei näherer Betrachtung des Diagramms fallen zwei Bereiche mit extrem hohen Ereignisfrachten auf.

Der erste Peak liegt zwischen km 31,5 und km 33, ein zweiter ist zwischen km 43 und km 46 zu beobachten (Abb. 14). Bei diesem ist eine stark positive Geschiebe-Bilanz zu verzeichnen, d. h. hier wurde offenbar massiv aufgelandet. Im Unterschied dazu zeichnet sich der flussabwärts gelegene Peak durch eine deutlich negative Bilanz aus. Hier wurde stark erodiert.

Im Diagramm der kumulierten Volumendifferenzen (Abb. 15) sind diese Prozesse am sprunghaften Abfall bzw. Anstieg der Summenkurve ebenfalls deutlich erkennbar.



**Abbildung 15:** Kumulierte Volumendifferenzen

Farbig markiert sind die Peaks im Geschiebefrachtendiagramm

Die Berechnungen decken sich gut mit den Auswertungen, die kurz nach dem Hochwasser gemacht wurden und in der Ereignisdokumentation des BMFLUW (2007) zusammengefasst sind.

Diesen Beobachtungen zufolge wurde bei km 35 Eintiefung festgestellt. *Rudhardt et al. (2005)* modellierten für diesen Gerinneabschnitt eine durchschnittliche jährliche

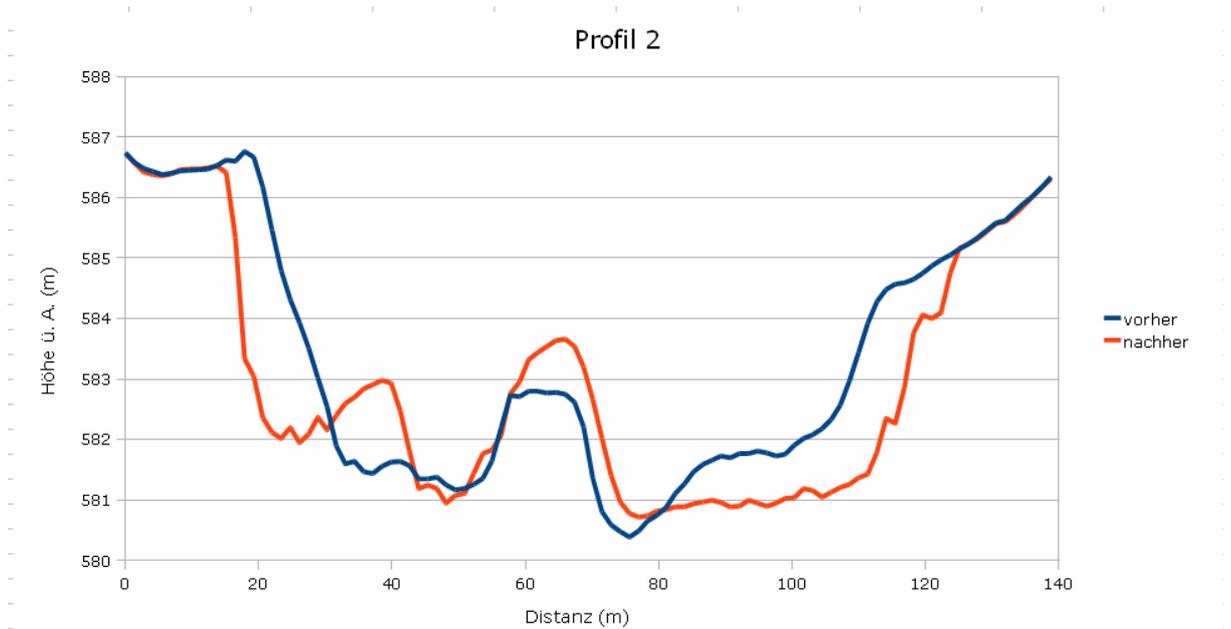
Geschiebefracht von etwas mehr als  $10.000\text{m}^3$  und damit die höchste Transportkapazität auf der gesamten Strecke.

Die mittlere Jahresfracht wurde hier am 22./23. August 2005 etwa um das 3 - fache überschritten.

Abb. 16 zeigt die Geländesituation bei km 31,6 vor und nach dem Durchgang der Hochwasserwelle im Profil. Der vorherrschende Prozess war Seitenerosion. Der Gerinnequerschnitt verbreiterte sich erheblich, vor allem am linken Ufer. Die Rückgriffweite beträgt an der breitesten Stelle 24m.

In der orographisch rechten Fließrinne wurde eine Schotterbank abgelagert, ebenso auf der Schotterbank zwischen den Fließrinnen.

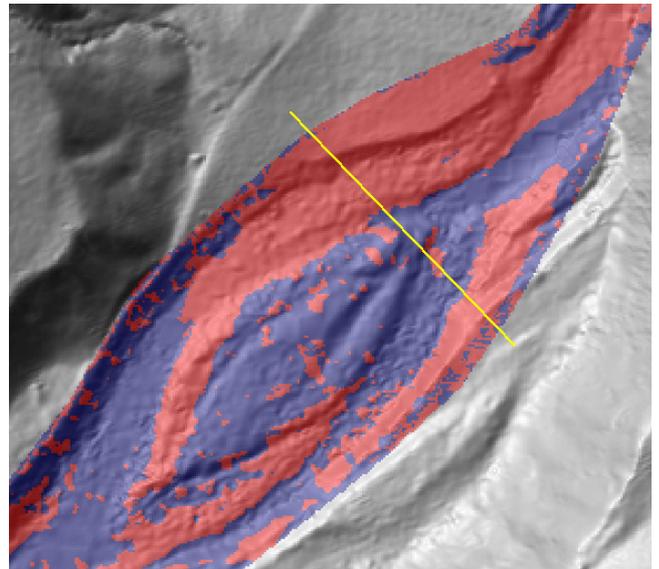
Etwa 10 km oberstrom, bei km 46,4 kam es zu massiven Eintiefungen der Sohle um 1,5 bis 2m. Profil 6 (Abb. 17) zeigt, dass der vorherrschende Prozess an dieser Stelle Sohlerosion war.

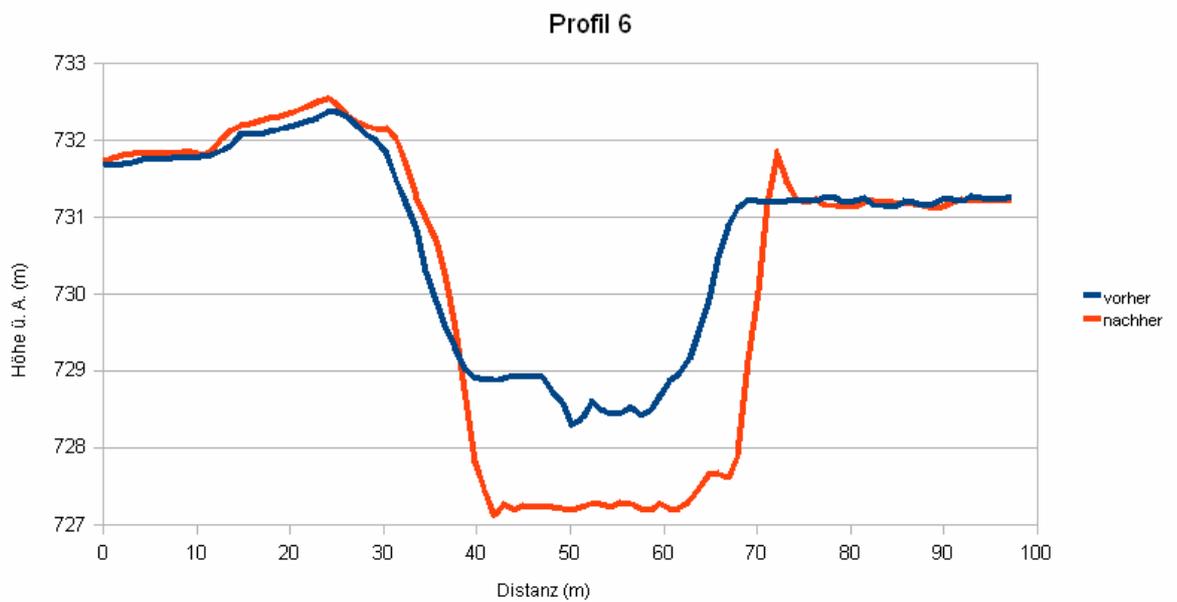


**Abbildung 16:** *Querprofil bei km 31,6  
(Blickrichtung flussaufwärts)*

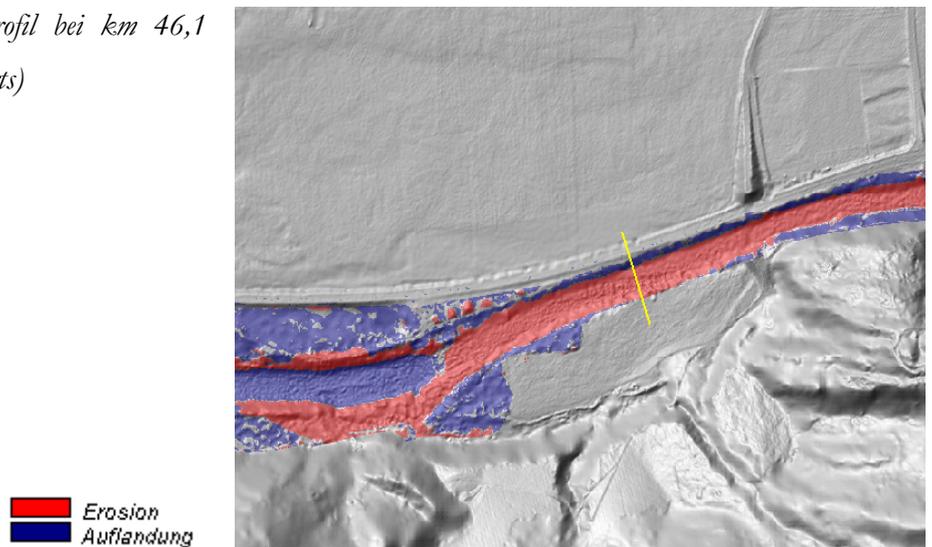
*Dem Differenzmodell ist das Reliefbild der  
Vorausbefliegung unterlagert. Darauf erkennt man  
gut die ursprüngliche Uferlinie*

■ Erosion  
■ Auflandung





**Abbildung 17:** Querprofil bei km 46,1  
(Blickrichtung flussaufwärts)

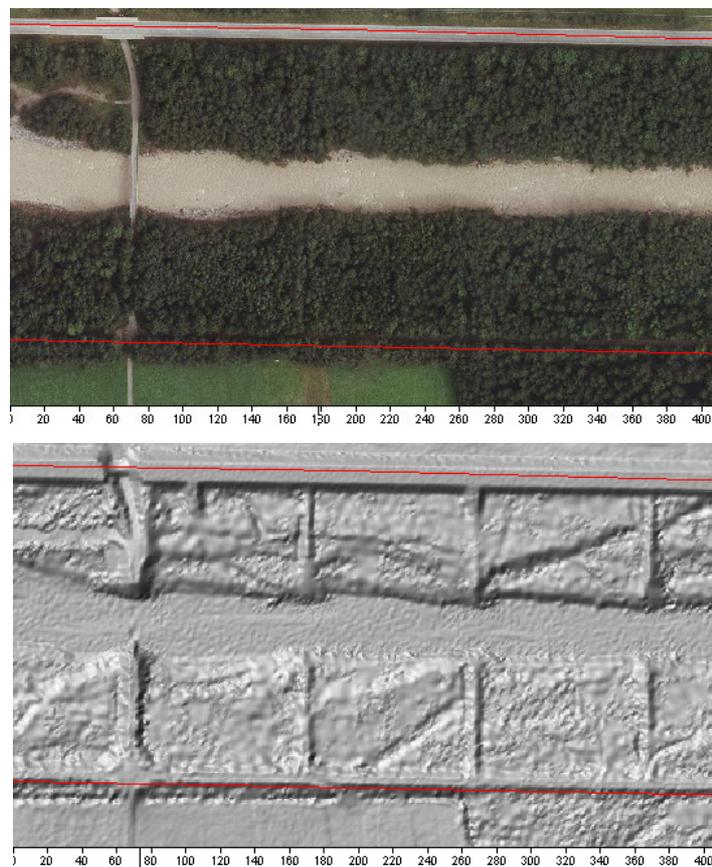


Auf den flussabwärts folgenden zweieinhalb Kilometern zwischen Schnepfau und Mellau wurde laut Differenzmodell sehr viel Material abgelagert. Allein auf dieser Strecke waren der Berechnung zu Folge mehr als 200.000 m<sup>3</sup> Geschiebe in Bewegung, lediglich 12 % davon verließen den Gerinneabschnitt wieder.

200.000 m<sup>3</sup> erscheinen für diese relativ kurze Strecke sehr hoch. Zum Vergleich: Kessler (2005) berechnete für einen 6 km langen Gerinneabschnitt im Lutzbach (ebenfalls in Vorarlberg) ein transportiertes Geschiebevolumen von 300.000 m<sup>3</sup>.

Die stark regulierte Ach hat in diesem Abschnitt einen gestreckten Lauf, das Gerinnebett ist mit Buhnen verbaut und mit dichtem Wald bestanden. Hier ist eher Eintiefung als Auflandung zu erwarten.

Die Abgrenzung des Gerinnes zur Differenzberechnung wurde hier anfangs sehr großzügig bemessen, um eventuelle Auflandungsprozesse im Wald (die hier aufgrund des geringen Gefälles nicht ausgeschlossen sind) mit erfassen zu können. Abbildung 18 verdeutlicht die Schwierigkeit, zu einer nachvollziehbaren Abgrenzung der vom Hochwasser beeinflussten Gerinnebereiche zu kommen.



*Abbildung 18: Abgrenzung des Gerinnes*

Angesichts der extrem hohen Differenzwerte liegt jedoch die Vermutung nahe, dass ein Teil des Geschiebevolumens durch den hohen Waldanteil im untersuchten Abschnitt vorgetäuscht wird. Das Querprofil bestätigt diese Vermutung (siehe Abb. 19).

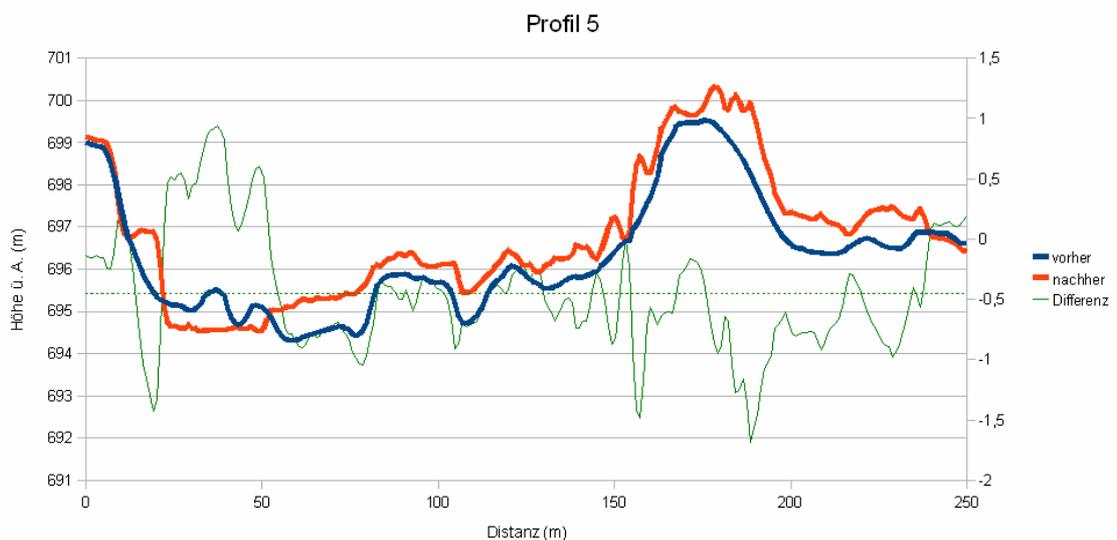
Die statistische Betrachtung des Differenzmodells für die Teilstrecke liefert für die Waldflächen einen Mittelwert von  $-0,62$  m bei einer Standardabweichung von  $\pm 0,4$  m. Das zweite Geländemodell liegt im Wald im Mittel mehr als einen halben Meter über dem ersten Modell, was auch im Profil deutlich zu erkennen ist.

Im freien Gelände wurde der Mittelwert der Differenzen zu  $0,05$  m  $\pm 0,1$  m bestimmt, hier passen die beiden Geländemodelle sehr gut aufeinander.

Es handelt sich also nicht um einen systematischen Fehler oder Messfehler, vermutlich sind die Daten unterschiedlich gefiltert worden. Im Profil fällt die viel stärker geglättete Oberfläche des ersten Geländemodells auf, was auch auf eine andere Interpolationsmethode hinweist.

Bezogen auf das in den Gerinneabschnitt eingetragene Geschiebevolumen wird dieses also um ca.  $0,6\text{m}^3/\text{m}^2$  zu hoch geschätzt. Umgerechnet auf die Waldfläche ergibt das ein Zuviel von ca.  $150.000\text{ m}^3$ .

Subtrahiert man dieses geschätzte Fehlervolumen vom ursprünglichen Wert, reduziert sich das Eintrags-Volumen auf ca.  $70.000\text{m}^3$ , was sehr viel realistischer erscheint.



**Abbildung 19:** *Querprofil flussauf von Mellau (km 42)*

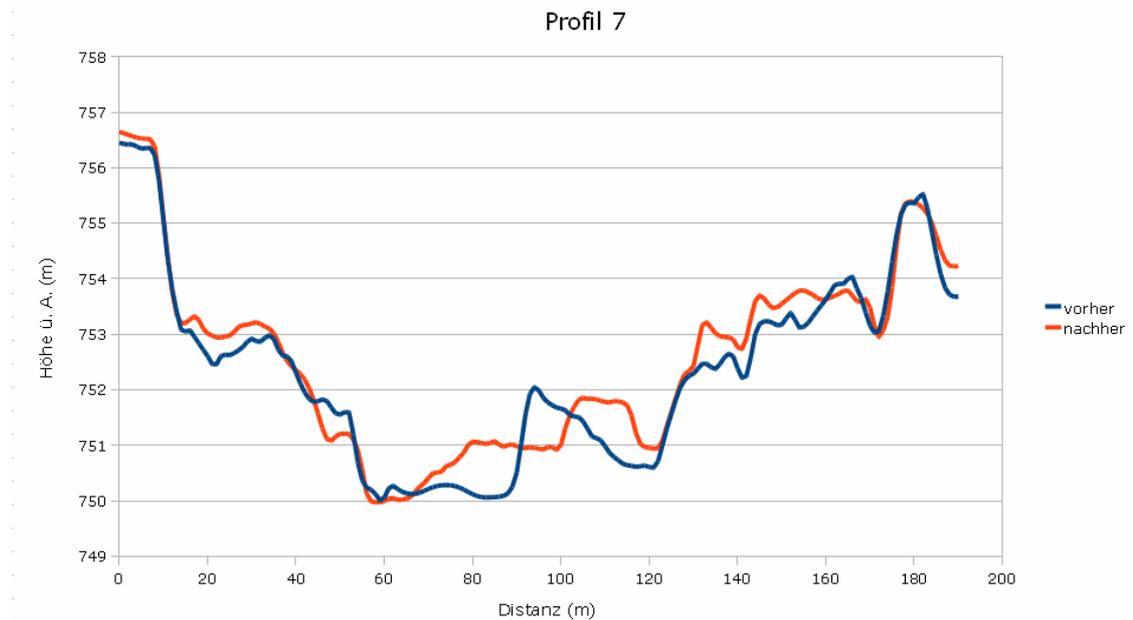
Zum Vergleich wurde der gleiche Geländeausschnitt mit dem Differenzmodell aus den Rohdaten (DGM\_pdiff) untersucht.

Mit den Filtereinstellungen aus Tabelle 3 konnten deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Das DGM\_pdiff hat nun einen Mittelwert von -0,29 und eine Standardabweichung von 0,49. Damit die Vergleichbarkeit gegeben ist, gehen wiederum nur die vom Hochwasser höchstwahrscheinlich unbeeinflussten Bereiche in die Statistik ein.

Das Querprofil aus DGM\_pv und DGM\_pn ist in Abb. 20 zu sehen.

Number of Steps	8
Initial threshold dz	0.2
Maximum threshold dz	300
Terrain slope	0.2
Increase window size	linear
Base of the window	1

**Tabelle 6:** Filteroptionen



**Abbildung 20:** Querprofil über die aus den Rohdaten berechneten DGM

Die aus dem DGM\_pdiff neu berechneten Geschiebevolumina sind in Tabelle 5 den Werten aus dem DGM\_gdiff gegenübergestellt.

Volumen	DGM_gdiff	DGM_pdiff
Austrag	15.950	33.890
Eintrag	203.836	174.249
Gesamt	219.786	208.139

**Tabelle 7:** *Veränderungen der Geschiebevolumina*

Der Sedimentaustrag wird durch die Korrektur im betrachteten Gesamtabschnitt etwa doppelt so hoch eingeschätzt, während das eingetragene Geschiebevolumen um etwa 30.000 m<sup>3</sup> abgenommen hat.

Sehr niedrige Ereignisfrachten waren bei km 39, km 44,5 und km 47 zu verzeichnen.

Km 39 liegt stromab einer mächtigen Auflandung, die durch den Rückstau einer Engstelle entstand. Dort blieb das meiste Geschiebe liegen. Das entstandene Geschiebedefizit löste offenbar starke Seiten- und/oder Tiefenerosion aus, da die Fracht am Ausgang dieses Gerinneabschnitts wieder sprunghaft anstieg (BMLFUW 2006). Tatsächlich wurde am Prallhang der Engstelle eine Lawinengalerie unterspült und massiv beschädigt (Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005).



**Abbildung 21:** *Die beschädigte Klausernald - Galerie*

*Quelle: Amt der Vorarlberger Landesregierung (2005)*

Auch bei km 47 kam es in Folge eines Rückstaus an der Engstelle zwischen Au und Schoppernau zu mächtigen Auflandungen (Profil 7 im Anhang), wodurch die Fracht kurzfristig stark absank. Das entstandene Geschiebedefizit resultierte in verstärkter Tiefenerosion, was bereits in Profil 6 nachgewiesen werden konnte.

## 7 Diskussion

Die mit Hilfe der Laserdaten festgestellten Gerinneprozesse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Erhebungen der Hochwasserdokumentation. Auflandung, Seiten- und Sohlerosion oder Umlagerung können sowohl in den Differenzbildern, als auch in den Profilen gut abgegrenzt werden.

Zur Größenordnung der Ereignisfrachten liegen kaum quantitative Angaben vor, die einen Vergleich ermöglichen.

*Rudhardt et al. (2005)* modellierten für Flusskilometer 0 bis 54 im Auftrag der Bundeswasserbauverwaltung Vorarlberg Geschiebefracht und Transportkapazität der Bregenzerach.

Der Modellierung zufolge verhält sich die Bregenzerach während größerer Hochwasserereignisse ähnlich wie im langjährigen Mittel.

Es wurden Gerinneabschnitte mit hohen Geschiebefrachten zwischen km 32 und 34, zwischen km 35 und 37 sowie zwischen km 46 und 47 festgestellt.

Die Autoren der Studie berechneten außerdem für ein  $HQ_{100}$  einen Geschiebeaustrag in das Bodenseedelta von ca. 10.000 m<sup>3</sup>. Diese Menge ist vergleichbar mit der mittleren jährlichen Transportrate der Jahre 1993 bis 2001.

Wie viel Geschiebe beim untersuchten Hochwasser letztendlich in den Bodensee gelangte, kann an dieser Stelle nicht gesagt werden, da bedeutende Geschiebelieferanten im Unterlauf (Subersach, Weissach und Rotach) nicht mehr berücksichtigt wurden.

Die sehr geringe Fracht am Beginn des untersuchten Abschnitts kann wohl darauf zurückgeführt werden, dass die Ach hier eine Felssohle ausbildet, welche die Sohle stabilisiert und deshalb nicht viel Erosion stattfinden konnte.

Im konkreten Fall war außerdem nicht mehr festzustellen, welcher Teil der Veränderungen tatsächlich dem Hochwasserereignis zuzuordnen war. Größere Ereignisse sind für den Zeitraum zwischen der ersten Befliegung und dem Auguthochwasser nicht bekannt, ebenso wenig für den Zeitraum zwischen August 2005 und der Nachbefliegung im Sommer 2006. Von weiteren bedeutenden Geschiebeumlagerungen ist also nicht auszugehen.

Sicher ist jedoch, dass durch den späten Zeitpunkt der Nachbefliegung einige Veränderungen nicht mehr dem Stand direkt nach dem Hochwasser wiedergeben.

Zum einen waren die Aufräumarbeiten zum Befliegungszeitpunkt größtenteils schon abgeschlossen und somit viele Ufersicherungen, Ausuferungen und Dammbrüche wiederhergestellt. Dies trifft vor allem für Bereiche zu, in denen die Prozesse den Siedlungsraum betrafen. Als Beispiel sei hier das im Mündungsbereich des Argenbachs gelegene Gewerbegebiet bei Au genannt, das aufgrund eines Dammbrechens am Außenufer massiv von Geschiebeanlandungen betroffen war.

Zum anderen hatten im Frühjahr 2006 stellenweise bereits flussbauliche Maßnahmen begonnen.

Trotz der vergleichsweise hohen Genauigkeit von Laserdaten konnte gezeigt werden, dass die Berechnung von Geschiebevolumina mit Unsicherheiten verbunden ist. Diese Tatsache liegt in der Herstellung der Geländemodelle begründet. Die Filterung und dadurch bedingte Reduktion der Punktdichte kann Höhendifferenzen erzeugen, deren Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis nur schwer abzuschätzen sind. Die tatsächlichen Höhenfehler können nur unter Zuhilfenahme terrestrisch erhobener Kontrollpunkte bestimmt werden.

Auf jeden Fall empfiehlt es sich, Luftbilder einer Hochwasserbefliegung oder eine Kartierung von Überschwemmungsflächen heranzuziehen, um die kritischen Bereiche von vorneherein möglichst genau eingrenzen zu können.

Eine Überprüfung der Filtereinstellungen bzw. eine dem speziellen Fall angepasste Klassifizierung der Daten in Boden- und Nicht-Boden-Punkte ist eine weitere Möglichkeit, den Fehler zu reduzieren.

Ein ähnliches Problem wie die o. g. Wald- und Siedlungsbereiche stellen größere offene Wasserflächen dar. Wird eine Befliegung unmittelbar nach dem Ereignis durchgeführt, verursacht der hohe Wasserstand flächenhaft ungerichtete Reflexionen und damit Datenlücken. Bei Niedrigwasser kann man davon ausgehen, dass in Gewässern mit starkem Geschiebeaufkommen genügend Rauigkeitselemente über die Wasseroberfläche ragen, die vom Laserscanner erfasst werden können.

## 8 Zusammenfassung

Die Dokumentation von katastrophalen Naturereignissen leistet neben der monetären Schadensanalyse einen wichtigen Beitrag zu einem besseren Prozessverständnis und liefert Erkenntnisse zur Wirksamkeit unterschiedlicher Schutzmaßnahmen. Darüber hinaus stellt die Analyse solcher Ereignisse eine Wissensbasis für die weitere Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse bereit.

Zur flächenhaften Rekonstruktion von Geschiebefrachten bei Hochwasser eignen sich Geländedaten aus Laserscanning - Befliegungen aufgrund ihrer hohen Genauigkeit sehr gut.

Ebenso ermöglichen Geländemodelle aus Laserdaten die Abgrenzung von Prozessen wie Erosion, Auflandung und Umlagerung und die Lokalisierung von Geschiebedefiziten bzw. Geschiebeüberschuss.

Die Kenntnis der Geschiebedynamik hilft flussbauliche Maßnahmen besser zu steuern und trotzdem den Charakter der Bregenzerach als Geschiebe führenden Gebirgsfluss zu erhalten und – wo möglich - eine Eigenentwicklung zuzulassen.

## Literatur

*Amt der Vorarlberger Landesregierung (2005): DAS STARKREGEN- UND HOCHWASSEREREIGNIS DES AUGUST 2005 IN VORARLBERG.*  
*www.vorarlberg.at*

*Barber, D., Mills, J. (2007): RAPID MAPPING TECHNIQUES IN COASTAL ENVIRONMENT: MONITORING THE COASTLINE.* The Royal Institution of Chartered Surveyors, [www.rics.org](http://www.rics.org)

*Bezola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: EREIGNISANALYSE HOCHWASSER 2005, TEIL 2 – Analyse von Prozessen, Maßnahmen und Gefahregrundlagen.*  
Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.

*Brenner, C., Sithole, G., Vosselman, G. (2006): AERIAL LASER SCANNING TUTORIAL.* International Summer School „Digital Recording and 3D Modeling“, Aghios Nikolaos. Online: [http://www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/publikationen/2006/brenner\\_tutorial\\_part1.pdf](http://www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/publikationen/2006/brenner_tutorial_part1.pdf)

*BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (Hrsg) (2006): HOCHWASSER 2005 –EREIGNISDOKUMENTATION.*

*Bundesamt für Wasserwirtschaft, [www.ivbhp.at](http://www.ivbhp.at)*

*Butkiewicz, T., Chang, R., Wartell, Z., Ribarsky, W. (2008): VISUAL ANALYSIS FOR LIFE LIDAR BATTLEFIELD CHANGE DETECTION: Proceedings of SPIE Vol. 6983*

*CRAMS - Centre for Applied Remote Sensing, Modeling and Simulation (2006): LIDAR – OVERVIEW OF TECHNOLOGY, APPLICATIONS, MARKET FEATURES AND INDUSTRY.* University of Victoria, BC.

*Corsini, A. et al. (2009): ESTIMATING MASS-WASTING PROCESSES IN ACTIVE EARTH SLIDES – EARTH FLOWS WITH TIME-SERIES OF HIGH-RESOLUTION DEMS FROM PHOTOGRAMMETRY AND AIRBORNE LIDAR.* *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 433-439. [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net)

*Devitte, O. et al. (2008): TRACING LANDSLIDE DISPLACEMENTS BY MULTI-TEMPORAL DTM'S: A COMBINED AERIAL STEREOGRAMMETRIC AND LIDAR APPROACH IN WESTERN BELGIUM.* In: *Engineering Geology*, Vol. 99, S. 11 – 22.

*DVWK (1992): DVWK Regelwerk 127/1992 Geschiebemessungen*

*Geist, T. (2002): DIGITALE GELÄNDEMDELLE AUS FLUGZEUGGESTÜTZTEN LASERSCANNER-DATEN UND IHRE ANWENDUNG FÜR GLAZIOLOGISCHE FRAGESTELLUNGEN.* *Innsbrucker Jahresbericht 2001/02*

*Glenn, N.F., Stretker, D.R., Chadwick, D.J., Tackray, G.D., Dorsch, S.J. (2006): ANALYSIS OF LIDAR-DERIVED TOPOGRAPHIC INFORMATION FOR*

CHARACTERIZING AND DIFFERENTIATING LANDSLIDE MORPHOLOGY AND ACTIVITY. In: *Geomorphology*, Vol. 73, S. 131-148.

Habersack, H. (2004): SCHWEBSTOFF- UND GESCHIEBETRANSPORT BEI HOCHWASSEREREIGNISSEN: Ursachen und Auswirkungen. Präsentation Floodrisk

Hengl, T., Evans, I. S. (2009): MATHEMATICAL AND DIGITAL MODELS OF THE LAND SURFACE. In: Hengl, T., Reuter, H. eds (2009): *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Vol. 33.

Hollaus, M., Wagner, W., Eberhöfer, C., Karel, W. (2006): ACCURACY OF LARGE-SCALE CANOPY HEIGHTS DERIVED FROM LIDAR DATA UNDER OPERATIONAL CONSTRAINTS IN A COMPLEX ALPINE ENVIRONMENT. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 60, S. 323 – 338.

Irish, J. L., Lillycrop, W. J. (2002): SUPPORT FOR RAPID ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

USING AIRBORNE LIDAR TECHNOLOGY. *Proceedings, 22nd Army Science Conference, Baltimore, Maryland.*

<http://shoals.sam.usace.army.mil/Projects/Publications/Publications.asp>

Kääb, A. (2008): REMOTE SENSING OF PERMAFROST-RELATED PROBLEMS AND HAZARDS. In: *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol 19, 107 – 136. Online in: *Wiley InterScience*. [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)

Katzenbeisser, R., Kurç, S. (2004): AIRBORNE LASER-SCANNING, EIN VERGLEICH MIT TERRESTRISCHER VERMESSUNG UND PHOTOGRAMMETRIE. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 3, S. 179 – 187.

Kessler, J. (2006): DOKUMENTATION DER HOCHWASSEREREIGNISSE 2005. NUTZUNG VON LASERSCANNING AM BEISPIEL DES LUTZBACHES IM GROßWALSERTAL. Präsentation anlässlich der Expertentagung: *Dokumentation von Naturereignissen, Bregenz.*

Kodde, M. P. et al. (2007): AUTOMATIC GLACIER SURFACE ANALYSIS FROM AIRBORNE LASER SCANNING. In: *LAPRS Vol. XXXVI, Part 3 / W 52. ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser 2007, Espoo.* Online: [http://www.commission3.isprs.org/laser07/final\\_papers/Kodde\\_2007.pdf](http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Kodde_2007.pdf)

Kiing, Alfons: SEDIMENTHAUSHALT UND FLUSSMORPHOLOGIE DER OBEREN BREGENZERACH. *Diplomarbeit, Innsbruck, 2000.*

Lee, S., Wolberg, G., Shin, S.Y. (1997): SCATTERED DATA INTERPOLATION WITH MULTILEVEL B-SPLINES. *IEEE Transactions On Visualisation And Computer Graphics*, Vol. 3, Nr. 3

Markart, G. et al. (2007): 22. UND 23. AUGUST 2005 – ANALYSE VON HOCHWASSER- UND RUTSCHUNGSEREIGNISSEN IN AUSGEWÄHLTEN GEMEINDEN VORARLBERGS. *BFW-Dokumentation;*

*Schriftenreihe des Bundesforschungs-und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 2007, Nr. 5, 48 S.*

Marti, Ch., Bezzola, G. (2003): SOHLENMORPHOLOGIE IN FLUSS-AUFWEITUNGEN. *Turbulenzen in der Geomorphologie, Jahrestagung der SGMG, Erstfeld.*

Mason, T. J. (2004): RAPID MAPPING OF THE 3D URBAN ENVIRONMENT. *XXth ISPRS Congress Proceedings, Istanbul. Online:*  
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/442.pdf>

Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R. (2005): REMOTE SENSING OF LANDSLIDES: AN ANALYSIS OF THE POTENTIAL CONTRIBUTION TO GEO-SPATIAL SYSTEMS FOR HAZARD ASSESSMENT IN MOUNTAINOUS ENVIRONMENTS. *Remote Sensing Of Environment, Vol. 98, S. 284 – 303.*

Mitasova, H., Overton, M., Harmon, R. S. (2005): GEOSPATIAL ANALYSIS OF A COASTAL SAND DUNE FIELD EVOLUTION: JOCKEY'S RIDGE, NORTH CAROLINA. *Geomorphology, Vol. 72, S. 204 – 221.*

Murakami H., Nakagawa K., Hasegawa H., Shibata T., Iwanami E. (1999): CHANGE DETECTION OF BUILDINGS USING AN AIRBORNE LASER SCANNER. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, Vol. 54, S. 148 – 152.*

Parthl et al. (2004): *Fließgewässer in Vorarlberg. Teil 3: Strukturgüte der Fließgewässer im nördlichen Vorarlberg, Stand 2003.*

Pfeifer, N. (2003): OBERFLÄCHENMODELLE AUS LASERDATEN. *Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Delft University.*

Rehor, M. (2005): CLASSIFICATION OF BUILDING DAMAGE BASED ON LASER SCANNING DATA. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo. Online:*  
[http://www.commission3.isprs.org/laser07/final\\_papers/Rehor\\_2007.pdf](http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Rehor_2007.pdf)

Rudhardt et al. (2005): GESCHIEBE- UND SCHWEBSTOFFHAUSHALT DER BREGENZERACH. *Grundlagenstudie für die Maßnahmenplanung im Deltabereich und für den Hochwasserschutz entlang der Bregenzerach. Kurzfassung, Im Auftrag der Bundeswasserbauverwaltung Vorarlberg*

Rutschmann, P. (2006): VORLESUNG GESCHIEBE/FLUSSBAU *Ergänzungskurs. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserrwirtschaft, Technische Universität München*

Schälchli, Abegg + Hunzinger (2005): *Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fließgewässern. Studie im Auftrag des BAFU, Zürich,*  
<http://www.bafu.admin.ch/gevaesserschutz/04854/index.html?lang=de>

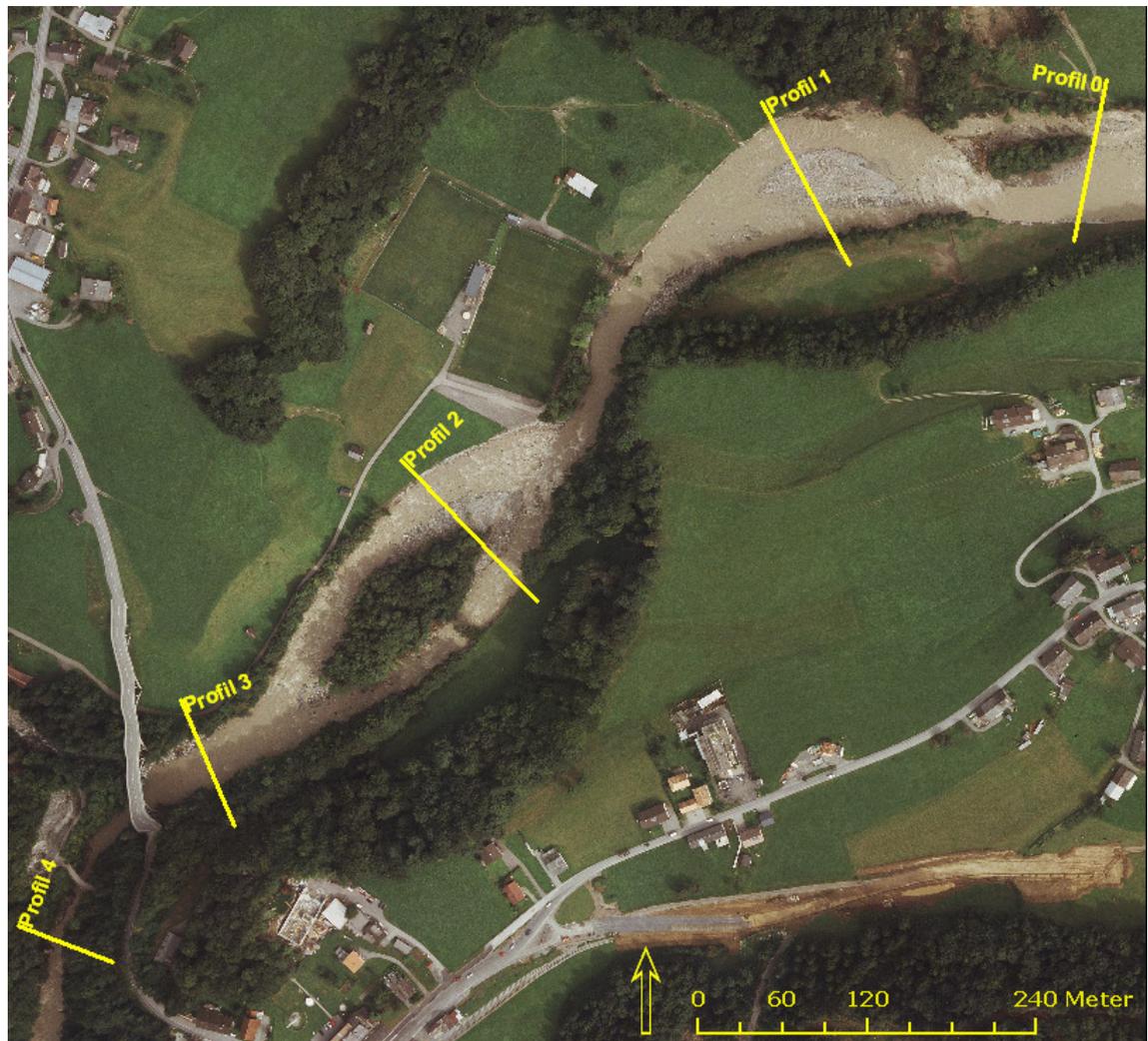
Scheidt, C., Rickenmann, D., Chiari, M. (2008): THE USE OF AIRBORNE LIDAR DATA FOR THE ANALYSIS OF DEBRIS FLOW EVENTS IN SWITZERLAND. *Nat. Hazards Syst. Sci., 8, 1113-1127.*

- Sitohle, G., Vosselman, G. (2005): FILTERING OF AIRBORNE LASER SCANNER DATA BASED ON SEGMENTED POINT CLOUDS. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laserscanning 2005", Enschede. Online: <http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/066.pdf>
- TerraImaging: Change Detection. [www.terraimaging.de](http://www.terraimaging.de)
- Thoma, D. P., Gupta, S. C., Bauer, M.E., Kirchoff, C. E. (2005): AIRBORNE LASER SCANNING FOR RIVERBANK EROSION ASSESSMENT. *Remote Sensing Of Environment*, Vol. 95, S. 493 – 501.
- Trevisani, S. (2005): DISASTER INFORMATION SYSTEM FOR ALPINE REGIONS (DIS-ALP). WP7: Innovative Tools for Information Collection. Progress Report 2: Airborne LiDAR Data: Management and Handling Issues. Online: [http://www.dis-alp.org/modules/UpDownload/store\\_folder/Work\\_Packages/WP7/WP7\\_2.pdf](http://www.dis-alp.org/modules/UpDownload/store_folder/Work_Packages/WP7/WP7_2.pdf)
- Turowski, J., Badoux, A., Rickenmann, D., Fritschi, B. (2008): ERFASSUNG DES SEDIMENTTRANSPORTS IN WILDBÄCHEN UND GEBIRGSFLÜSSEN – ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON GEOPHONMESSANLAGEN. In: *Wasser Energie Luft*, 100. Jg., Heft 1
- Vallet, J., Skaloud, J., Wiessmann, U. (2005): HELIMAP: DIGITAL IMAGERY/LIDAR HANDHELD AIRBORNE MAPPING SYSTEM FOR NATURAL HAZARD MONITORING . *Proceedings of the 6th Geomatic Week, Barcelona*. Online: [http://www.isprs.org/publications/related/semana\\_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/F01.pdf](http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/F01.pdf)
- Walter, V. (2004): OBJECT BASED CLASSIFICATION OF INTEGRATED MULTISPECTRAL AND LIDAR DATA FOR CHANGE DETECTION AND QUALITY CONTROL IN URBAN AREAS. *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Stuttgart*. Online: [www.isprs.org/commission8/workshop\\_urban/walter.pdf](http://www.isprs.org/commission8/workshop_urban/walter.pdf)
- Vu; T. T, Matsuoka, M.; Yamazaki, F. (2004): LIDAR-BASED CHANGE DETECTION OF BUILDINGS IN DENSE URBAN AREAS. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS Proceedings 2004, Vol. 5, S. 3413 – 3416*.
- White, S. A., Wang, Y. (2002): Utilizing DEMs derived from LIDAR data to analyze morphologic change in the North Carolina coastline. *Remote Sensing Of Environment*, Vol. 85, S. 39 – 47.
- Würländer, R., Eder, K., Geist, Th. (2004): HIGH QUALITY DEMS FOR GLACIER MONITORING - IMAGE MATCHING VERSUS LASER SCANNING. XX ISPRS Congress, Commission VII, WG VII/6, Istanbul.
- Würländer, R., Rieger, W., Drexel, P., Briese, Ch. (2005): LANDESWEITE DATENERHEBUNG MIT ALS: TECHNOLOGISCHE HERAUSFORDERUNGEN UND VIELSEITIGE GIS-ANWENDUNGEN. <http://www.wenger-oebn.at/pdf/agit2005.pdf>
- Zhu, L., Shimamura, H., Tachibana, K., Li, Y., Gong, P. (2008): BUILDING CHANGE DETECTION BASED ON OBJECT EXTRACTION IN DENSE

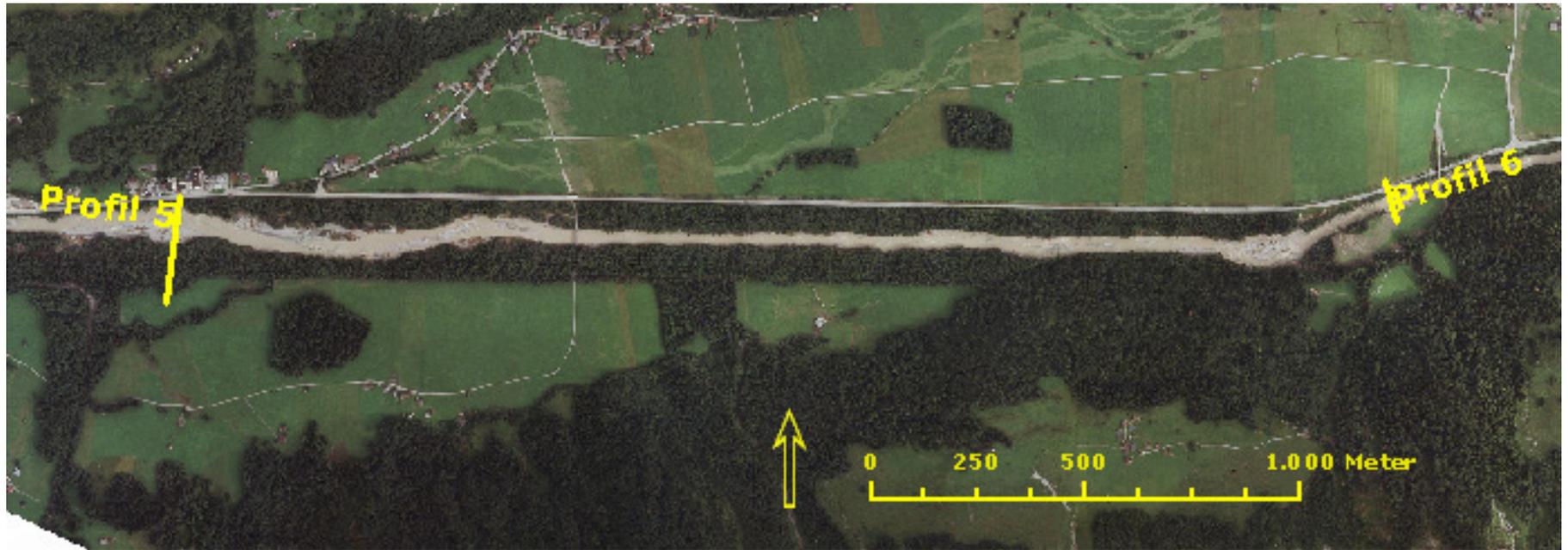
URBAN AREAS. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVII, Part B7*. Beijing.

Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C. (2002): A PROGRESSIVE MORPHOLOGICAL FILTER FOR REMOVING NON-GROUND MEASUREMENTS FROM AIRBORNE LIDAR DATA. *Journal of Latex Class Files, Vol. 1, No. 8*

# Anhang



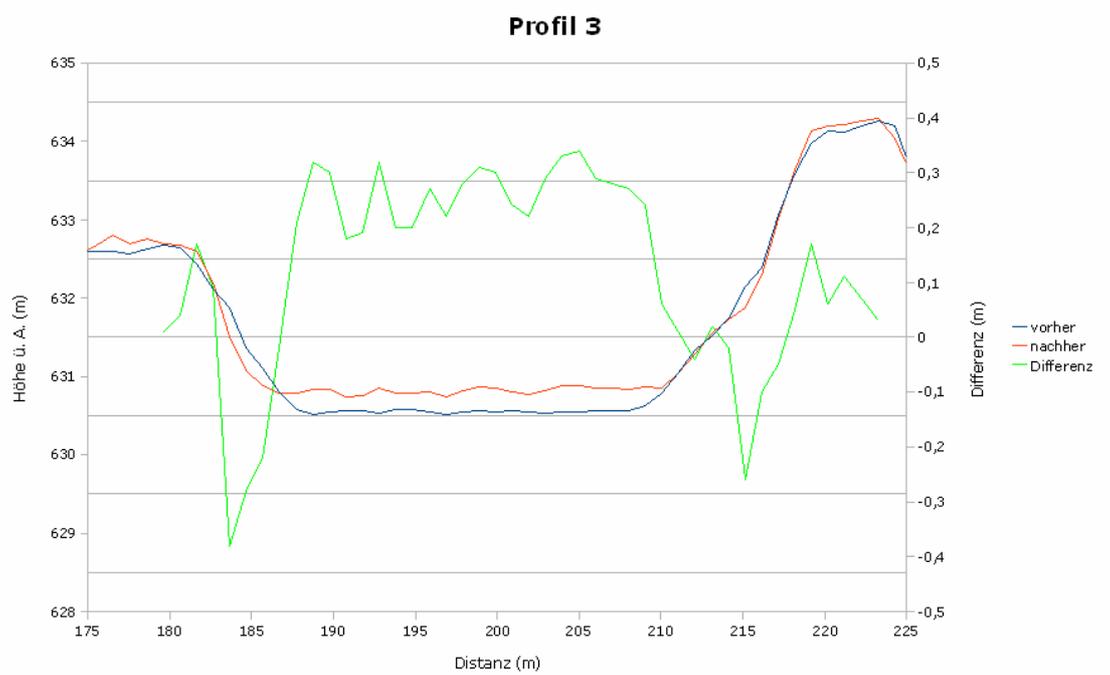
*Abbildung 22: Lage der Profile 0 bis 4*

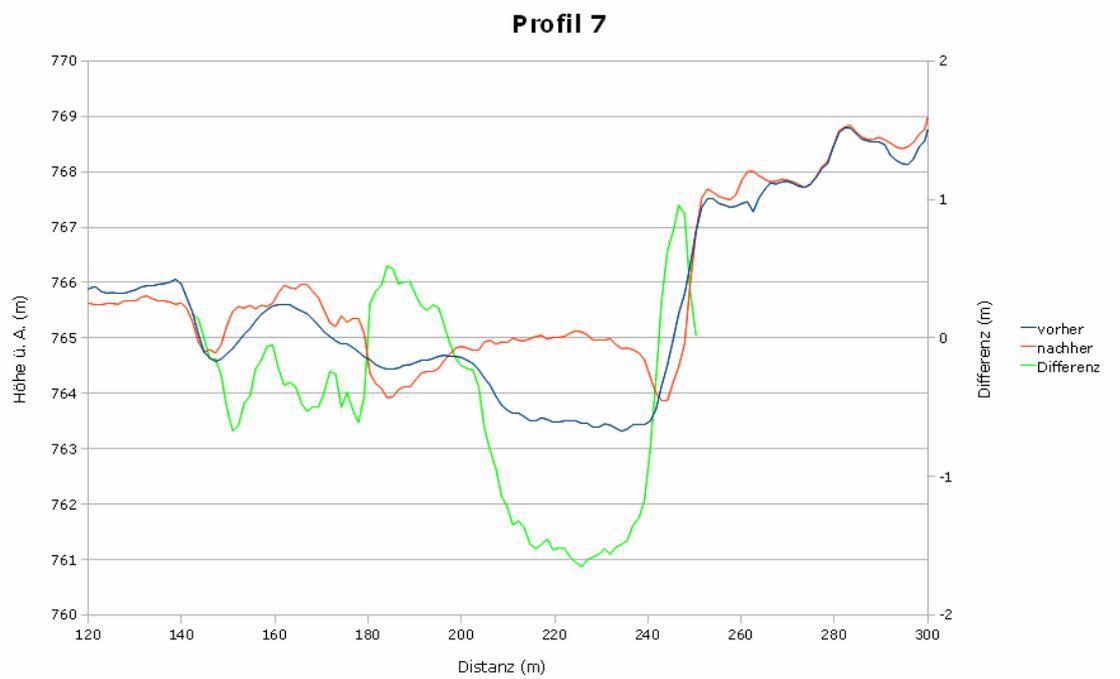
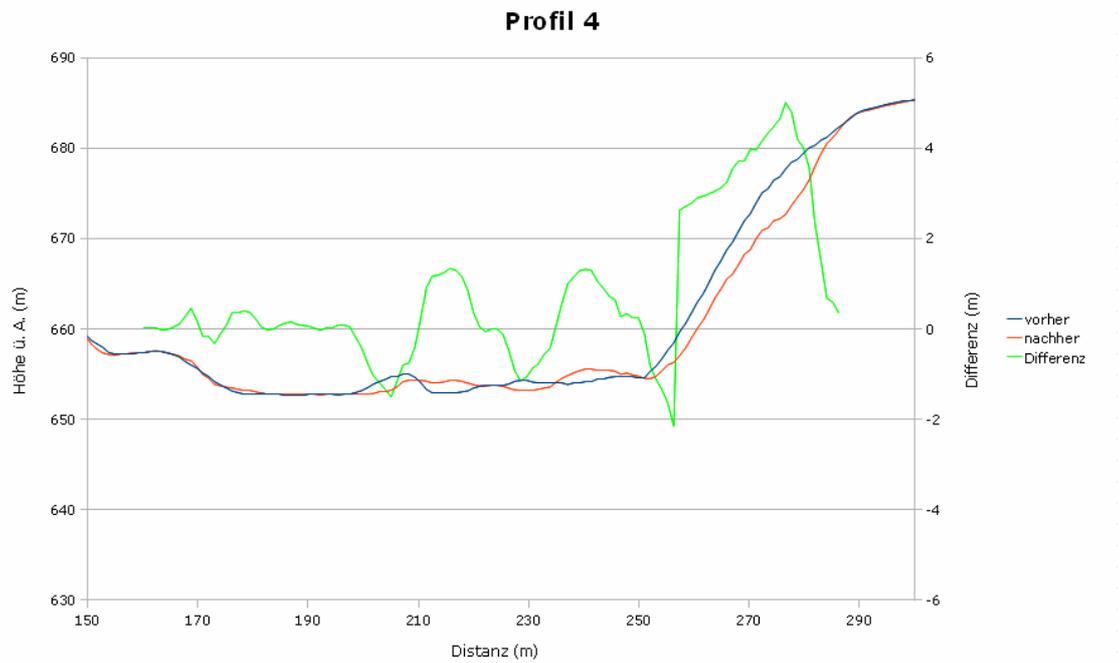


*Abbildung 23: Lage der Profile 5 und 6*

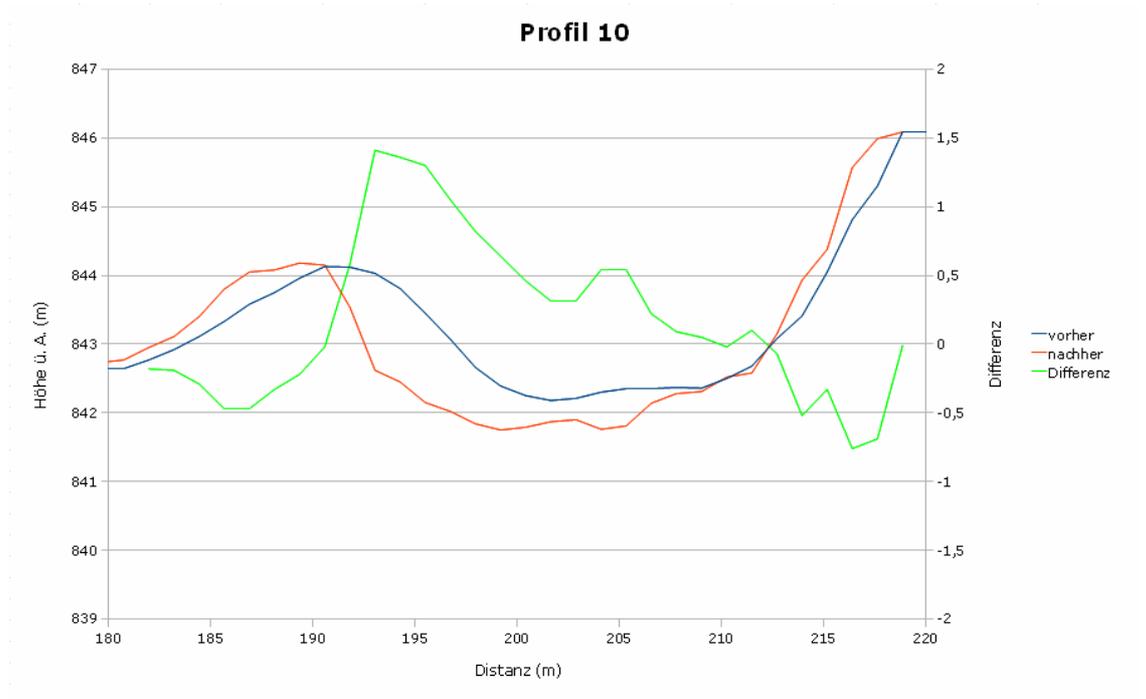


Abbildung 24: Lage der Profile 7 bis 10





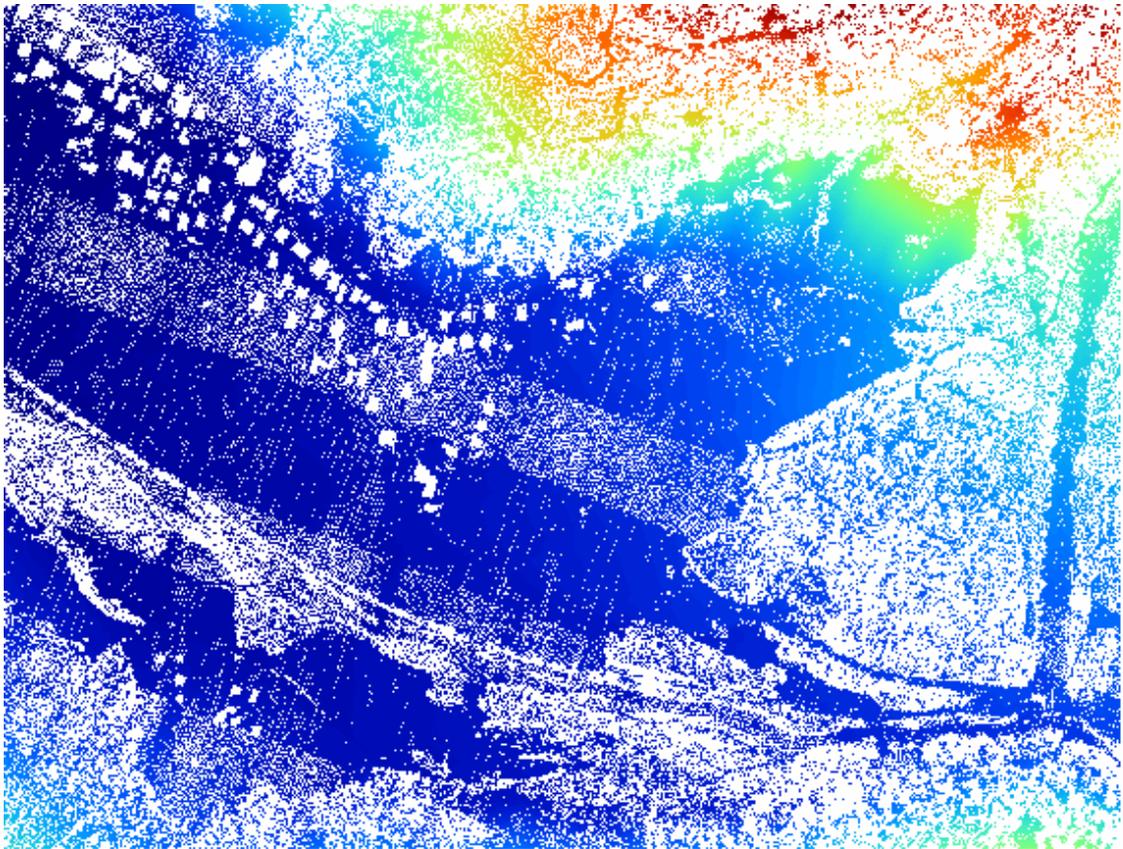




Abschnitt Nr	Abschnitt-km	Eintrag	Austrag	Bilanz (Eintrag – Austrag)
14	23500	5467,29	4167,85	1299,44
15	24000	7452,47	5195,66	2256,81
16	24500	4124,16	7705,75	-3581,59
17	25000	5251,47	5775,93	-524,46
18	26000	4621,14	3457,98	1163,16
19	26500	4662,96	5036,53	-373,57
20	27000	3941,95	5888,1	-1946,15
21	27500	4435,1	6995,27	-2560,17
22	28000	3092,86	5379,21	-2286,35
23	28500	14396,25	15554	-1157,75
24	29000	4859,88	7993,83	-3133,95
25	29500	2731,89	4251,15	-1519,26
26	30000	20516,4	13504,39	7012,01
27	30500	6784,92	12387,51	-5602,59
28	31000	9351,86	11032,88	-1681,02
29	31500	21337,51	24514,04	-3176,53
30	32000	14944,11	30540,64	-15596,53
31	32500	6662,15	20951,7	-14289,55
32	33000	5036,27	5453,28	-417,01
33	33500	17037,93	3125,34	13912,59
34	34000	10627,55	2232,23	8395,32
35	34500	7118,96	9228,26	-2109,3
36	35000	1929,1	5163,19	-3234,09
37	35500	15723,23	10476,8	5246,43
38	36000	5217,23	3646,52	1570,71
39	36500	15035,57	3517,17	11518,4
40	37000	10113,11	2226,16	7886,95
41	37500	4038,57	1305,29	2733,28
42	38000	2930,6	1793,16	1137,44
43	38500	4908,46	6359,02	-1450,56
44	39000	8054,35	410,92	7643,43
45	39500	9178,4	4837,59	4340,81
46	40000	16595,23	6671,02	9924,21
47	40500	13528,11	2324,69	11203,42
48	41000	16632,74	10515,13	6117,61
49	41500	9235,9	2001,84	7234,06
50	42000	8315,35	1786,94	6528,41
51	42500	13395,44	879,12	12516,32
52	43000	23573,6	1194,1	22379,5
53	43500	35022,66	5159,12	29863,54
54	44000	38885,09	3279,96	35605,13
55	44500	46466,47	569,41	45897,06
56	45000	44159,18	2267,85	41891,33
57	45500	45816,48	5382,92	40433,56
58	46000	38066,44	30918,62	7147,82
59	46500	6367,6	13947,92	-7580,32
60	47000	15083,05	55,76	15027,29
61	47500	13273,58	686	12587,58
62	48000	10153,31	1878,07	8275,24
63	48500	7468,74	1876,69	5592,05
64	49000	20488,512	3465,3	17023,212

65	49500	9868,48	4615	5253,48
66	50000	5759,91	1794,4	3965,51
67	50500	6629,63	1409,22	5220,41
68	51000	1263,98	1472,09	-208,11
69	51500	1237,52	2152,18	-914,66
70	52000	2654,23	1471,5	1182,73
71	52500	4559,73	567,29	3992,44
72	53000	24602,66	2618,32	21984,34
73	53500	3040,85	1594,48	1446,37
74	54000	2907,68	2948,12	-40,44
75	54500	7534,44	2340,09	5194,35

***Tabelle 8:** Geschiebevolumina in den Gerinneabschnitten*



***Abbildung 25:** Ergebnis der Filterung Testgebiet 2*