



Universität für Bodenkultur Wien
Department Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Alpine Naturgefahren (IAN)

Peter Jordan Str. 82

Tel.: #43-1-47654-4350

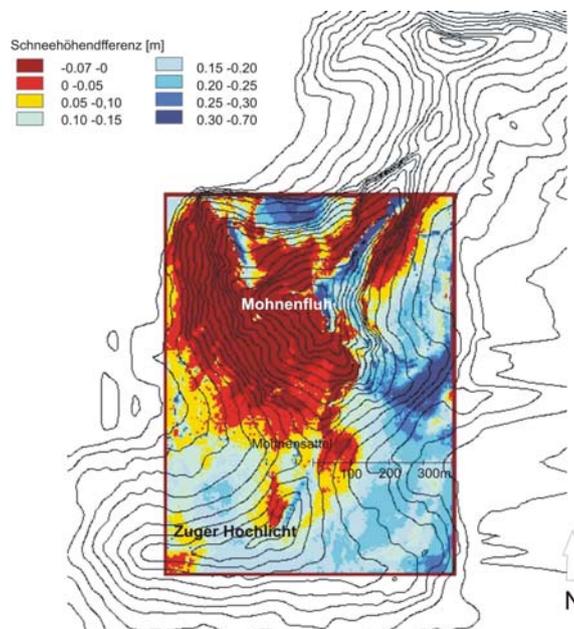
A-1190 WIEN

Fax: #43-1-47654-4390



Endbericht

IAN Report 106



Im Auftrag:



**Forsttechnischer Dienst für
Wildbach- und Lawinenverbauung
Sektion Vorarlberg**



Wien, November 2007

Report 106: SNOW DRIFT SIMULATION
Kriegerhorn

Im Auftrag von: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinverbauung,
Sektion Vorarlberg

Projektleitung: DI Dr. Alexander Prokop

Mitarbeiter: DI Dr. Harald Teufelsbauer, DI Peter Mayr, DI Clemens Schekulin, Mag.
Rebecca Mott, DI Gordon Friza, Christina Delaney

Universität für Bodenkultur

Department Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren

Peter Jordan Str. 82
A – 1190 Wien

Tel.: #43-1-47654-4350
Fax: #43-1-47654-4390

Endbericht

Report Nr. 106

Referenz (Literaturzitat): Prokop, A., Teufelsbauer, H., Mayr, P., Schekulin, C., Mott, R.,
Friza, G., Delaney, C. (2007): Snow Drift Simulation; IAN Report, Institut für Alpine
Naturgefahren, Universität für Bodenkultur - Wien (unveröffentlicht)

Wien, im November 2007



Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	3
2	PROBLEM	4
3	ZIELE.....	6
4	GRUNDLAGEN	7
4.1	Datenbeschaffung.....	7
4.2	Erhebungen im Gelände	8
4.3	Verwendete Software.....	9
5	ALLGEMEINE GEBIETSBESCHREIBUNG	10
5.1	Lage des Projektgebiets.....	10
6	WIND-STRÖMUNGSMODELL.....	12
6.1	Modellbeschreibung ARPS	13
6.1.1	Einführung.	13
6.1.2	Modellbeschreibung	13
6.1.3	Set-up des Modells.....	17
6.1.3.1	Initialisierung des Modells.....	18
6.1.3.2	Behandlung der Modellränder	18
6.1.4	Downscaling – Nesting: Generierung von externen Soundings anhand des aLMo – Modell Outputs.....	20
6.1.5	Bisherige Modellergebnisse.....	21
6.1.5.1	Wetterlage Südföhn.....	21
6.1.5.2	Wetterlage West - Nordwest.....	23
6.2	Vergleich der Windströmungsmodelle.....	25
7	HANGBEZOGENE ERMITTLUNG DER FLÄCHIGEN SCHNEEHÖHENVERTEILUNG	27
7.1	Zielsetzung für den zweiten Messwinter	27
7.2	Messdesign.....	28
7.3	Die Laserscanner	28
7.4	Messung	30
7.4.1	Atmosphärische Korrektion	30
7.4.2	Wetter	30



7.4.3	Zustand der Schneedecke.....	31
7.4.4	Standort.....	33
7.4.5	Koordinatensysteme.....	34
7.4.6	Evaluierung der Messung.....	34
7.4.7	Messablauf.....	36
7.5	Datenverarbeitung.....	39
7.5.1	Schneehöhen.....	40
7.5.2	Schneedeckenvolumen / Schneemasse.....	41
8	RESÜMEE.....	43
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	45
10	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	46



1 EINFÜHRUNG

Die genaue Quantifizierung der Schneemengen, die sich an bestimmten für den Beobachter interessanten Hängen ablagern, ist eine Schlüsselfrage sowohl für die Lawinenprognose als auch für die Dimensionierung von Schutzverbauungen. Diese ist bis jetzt allerdings an der Komplexität des Prozesses der Schneeverfrachtung gescheitert. Besonders die kontinuierliche Erfassung der Schneehöhe und auch Informationen über die Menge der Schneeverfrachtungen durch Wind waren bisher nur schwer zu messen, da die Schneeverfrachtung zu einer sehr inhomogenen Verteilung der Schneehöhen in stark gegliedertem Gelände führt. Sichtbare Auswirkungen sind die Bildung von Wechten und Schneedünen in Leehängen einerseits und von blank gefegten Luvhängen andererseits. Dies beeinflusst entscheidend die Lawinengefahr, aber auch das Pflanzenwachstum, sowie den Wasser- und den Energiehaushalt. Um potentielle Akkumulationsräume von Tribschnee und Neuschnee ausweisen zu können, ist es notwendig Kenntnis über Verfrachtungsmuster in potentiellen Gefährdungsbereichen von Lawinen zu erlangen.



2 PROBLEM

In den letzten Jahren haben sich allerdings die Möglichkeiten verbessert, die Problemstellung „Schneeverfrachtung“ zu bearbeiten und somit die Quantifizierung der Schneemenge, die sich an bestimmten für den Beobachter interessanten Hängen ablagern, zu bestimmen. Einerseits können durch rechenintensive computergestützte Modelle Windströmung und Schneeablagerungsverhalten simuliert werden. Andererseits kann mittels Laserscanner über Entfernungsmessung die Schneehöhe flächig bestimmt werden. Da sich beide Verfahren international erst in der Forschungs- und Erprobungsphase befinden, wurden diese in einem ersten Schritt (Zwischenbericht Rep. 106, November 2005) auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis überprüft. Bei Testmessungen im Winter 2004/05 mit dem Laserscanner Riegl LPM-i800HA wurden gute Ergebnisse bezüglich der flächigen Schneehöhenmessung erzielt. Um diese Methode nun analytisch zu evaluieren und im Detail die Vorgangsweise bei der Messung zu bestimmen, wurde für den Messwinter 2005/06 (Zwischenbericht Rep. 106, November 2006) ein Vergleich zweier unterschiedlicher Laserscanner angestrebt, um kontinuierliche Messreihen aufzunehmen. Durch diesen Vergleich und mehrerer Validierungsmessungen mittels alternativer Meßmethoden konnten Genauigkeitsbereiche der einzelnen Laserscanner für die Messung der flächigen Schneehöhe bestimmt werden. Da sich herausstellte, daß der Laserscanner Riegl LPM-i800HA deutlich besser für diese Anwendung geeignet ist, wurden im Messwinter 2006/07 sämtliche Laserscannmessungen mit diesem Gerät durchgeführt, wobei die Messungen in einem Genauigkeitsbereich der Schneehöhe von 10 cm bis zu einer Entfernung von 500 m ausgeführt wurden.

Die Modellierung der Schneeverfrachtungsprozesse stellt ein wichtiges Instrument für eine Gefahrenbeurteilung dar. Die Schneeverfrachtung wird bestimmt durch das synoptikskalige Strömungsfeld und durch das lokale Windfeld. Strömungsmuster wie Beschleunigungseffekte in Gratnähe oder die Ablösung der Hauptströmung vom Boden bewirken typische und regelmäßige Akkumulationsmuster des Schnees in Abhängigkeit der Großwetterlage. Hierbei ist eine Unterscheidung zwischen der Umverlagerung von bereits abgelagertem Schnee durch die Prozesse Saltation und Suspension und der



räumliche Verteilung des Niederschlages, auch als präferentieller Niederschlag bezeichnet, notwendig. Vor allem während starken Schneefällen kann es aufgrund des Einflusses des Strömungsfeldes auch bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten zu einer starken räumlichen Verteilung des Niederschlags und damit zu einer verstärkten Akkumulation von Neuschnee in Lawinhängen kommen. Diese zwei Prozesse sollten demnach in einer Verfrachtungssimulation gesondert behandelt werden. Die Schneeverfrachtung ist ein Zweikomponentensystem aus Luft und Eispartikel. Der Schnee unterliegt weiteren meteorologischen Einflüssen. Vor allem die Energiebilanz an der Schneeoberfläche sowie der Schneedeckenaufbau über den Winterverlauf beeinflussen die Menge an Schnee, welche umverfrachtet und in potentiellen Lawinhängen abgelagert wird. Nicht zuletzt beeinflusst die Einwirkung des Windes die Schneedeckeneigenschaften.

Da sich nach den Erfahrungen der Vergangenheit die Handhabung sowie die Evaluierung der Windströmungssimulation als äußerst schwierig erwiesen hat sollte nun diese Problematik weiteren Vertiefungen unterzogen werden und der Zusammenhang zwischen den mittels der Laserscanner aufgenommenen Daten und den Ergebnissen der Windströmungssimulation analysiert und auf deren Aussage überprüft werden. Intensive empirische Messungen im freien Gelände und Entwicklungsarbeit bei der Modellbildung waren hier von Nöten.



3 ZIELE

Am konkreten Beispiel des Bereiches der Stützverbauung am Kriegerhorn in der Gemeinde Lech am Arlberg wurden die Verfahren Laserscannen bzw. Schneeverfrachtungssimulation erprobt. Da sich bei Testmessungen im Winter 2004/05 mit dem Laserscanner Riegl LPM-i800HA die flächige Messung der Schneehöhenverteilung als viel versprechende Methode erwiesen hat, sollte anhand einer aufwendigen Messreihe im folgenden Winter die genauen Möglichkeiten für dessen Anwendung im operativen Gebrauch der WLV festgestellt werden. Hierfür wurde ein Vergleich zweier unterschiedlicher Laserscanner angestrebt, um analytisch die Messergebnisse zu evaluieren und im Detail die Vorgangsweise bei der Messung zu bestimmen. Der Laserscanner Riegl LPM-2k sollte in erster Linie aufgrund seiner Reichweite von bis zu 2500 m für diese Messreihen zusätzlich zum Laserscanner Riegl LPM-i800HA verwendet werden. Folgende entscheidende Kriterien für brauchbare Messergebnisse sollten anhand dieser Messreihen zur Verwendung eines Laserscanners zur flächigen Schneehöhenmessung durchleuchtet werden:

- Benötigte Infrastruktur
- Meteorologische Bedingungen
- Zustand der Schneedecke
- Möglichkeiten des Datenmanagements

Für eine Bestimmung der Prozesse des Zustandekommens der mit dem Laserscanner gemessenen Schneehöhenverteilung ist eine Kenntnis der meteorologischen Bedingungen zwischen den einzelnen Aufnahmen der flächigen Schneehöhenverteilung von Nöten. Hierfür werden komplette meteorologische Messstationen, die auch zusätzlich Schneeigenschaften kontinuierlich aufzeichnen, im Untersuchungsgebiet errichtet. Zusammen mit den verschiedenen Windmessungseinrichtungen sollten nun durch mögliche Zusammenhänge mit den flächigen Schneehöhenverteilungen Aussagen vor allem über die Schneeverfrachtung und über das Erosions- und Ablagerungsmuster getroffen werden. Da allerdings Windmessungen nur als

Zwischenbericht IAN Rep. 106



Punktmessungen zur Verfügung stehen, muss weiterhin auch die Simulation der Windströmung über die Topographie des Untersuchungsgebietes verbessert werden. Die bisher zur Simulation der Windströmung verwendete Software „Comsol“ (früher „Femlab“) hat sich trotz Ihrer anwendungsfreundlichen Oberfläche als nur bedingt einsetzbar erwiesen (Zwischenbericht Rep. 106, November 2005).

Um der Komplexität der Vorgänge gerecht zu werden, wurde für die vorliegende Modellierung ein gekoppeltes System aus Modellen verwendet. Zusätzlich ist es notwendig erzielte Modellergebnisse mittels eines adäquaten Meßsystems zu evaluieren. Punktuelle Meßergebnisse sind für die Evaluierung von flächenverteilten Modellergebnissen nicht als sinnvoll zu erachten. Um die flächige Schneedeckenverteilung zu erheben, müssen demnach hochauflösende Meßergebnisse herangezogen werden. Die horizontale Auflösung der Meßergebnisse muß kleinskaliger sein als die gewählte horizontale Auflösung der Modellierung. Um die typischen Strömungsmuster berechnen zu können wurden Strömungsfelder mittels eines atmosphärischen Strömungsmodells, ARPS (Advanced Regional Prediction System), berechnet. Hierbei werden für eine bestimmte Großwetterlage thermisch und dynamisch induzierte Strömungen berechnet. Um die Turbulenz zu berechnen, wurde eine sehr geringe horizontale Auflösung gewählt. Vor allem für sehr alpines und stark gegliedertes Gelände ist eine kleinskalige Berechnung der Strömung von großer Bedeutung, wenn auch mit erhöhter numerischer Anforderung begleitet. Um Kenntnis über die Strömungen in der Umgebung eines gefährdeten Hanges zu erhalten, werden Windfelder mit einer horizontalen Auflösung von 25 m berechnet. In Abhängigkeit der Großwetterlagen können lokale Strömungsmuster und das mittlere Windfeld berechnet werden. Die erlangte Information der Simulation auf der Basis von 25 m ermöglicht eine weitere Simulation eines Wind- und Turbulenzfeldes für lokale Hänge mit einer höheren Auflösung von derzeit 5 m. Neben der Information über die Schneedeckenverteilung, kann auch der Schneedeckenaufbau in den Akkumulationsräumen berechnet und so Aussagen über die Stabilität der Schneedecke getroffen werden. Durch eine räumlich differenzierte Betrachtung der Energiebilanz kann für jede Gitterzelle Information über kurzweilige Einstrahlung und langwellige Ausstrahlung bezogen werden.



Ziel dieser Studie ist es also, die Schneemassenbilanz über den Winter für den Projektbereich anhand der Messungen mit den Laserscannern zu ermitteln und durch die simulierte Windströmung und Schneeverfrachtung Aussagen über Erosions- bzw. Ablagerungsverhalten zu erhalten. Zusätzlich sollen Lösungsansätze für die generelle Problemstellung der Schneeverfrachtung erarbeitet werden und so die Verwendung der Ergebnisse im operativen Gebrauch der WLV überprüft werden.



4 GRUNDLAGEN

4.1 Datenbeschaffung

Meteorologische Daten:

Messstation Palmenalpe (Inh. IAN-BOKU):

- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Windrichtung (°)
- Lufttemperatur (°C)
- Luftfeuchte (%rF)
- Schneeoberflächentemperatur (°C)
- Schneetemperaturen in 8 Tiefen (°C)
- Schneehöhe (cm)

Messstation Exposition Nord Speicherteich (Inh. IAN-BOKU):

- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Windrichtung (°)
- Lufttemperatur (°C)
- Luftfeuchte (%rF)
- Schneeoberflächentemperatur (°C)
- Schneetemperaturen in 8 Tiefen (°C)
- Schneehöhe (cm)

Messstation Kriegerhorn (Inh. Skilifte Lech):

- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Windrichtung (°)
- Lufttemperatur (°C)
- Luftfeuchte (%rF)

Topographische Daten

DTM, 1 Meter Raster (airborne Laserscann Vorarlberg)

Orthophotos und GIS-files (WLV)



Laserscanndaten

Laserscanner Riegl LPM-i800HA

Laserscanner Riegl LPM-2K

4.2 Erhebungen im Gelände

4.2.1 Wind

Da das stark gegliederte alpine Gelände sehr unterschiedliche Windströmungen hervorruft, müssen verschiedene Windmessungen durchgeführt werden. Diese betreffen die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in unterschiedlicher Höhe, um Windprofile erstellen zu können und an unterschiedlichen Stellen im Gelände, um die räumliche Verteilung zu beurteilen. Hierfür kommen verschiedene Windmessgeräte zum Einsatz.

4.2.2 Schneedecke

Die Beschaffenheit der Schneedecke hat unmittelbare Auswirkung auf den Schwellenwert an Windgeschwindigkeit, ab welchem Schneeverfrachtung einsetzt. Um diesen zu beurteilen, wird die Schneedecke in der Zeit an der Verfrachtungseignisse stattfinden, auf Temperatur und Schneemorphologie untersucht. Verschiedene Temperaturmessgeräte sowie übliche Schneeprofil-Messgeräte werden zu diesem Zweck verwendet.

4.2.3 Schneehöhe

Um die umgelagerten Schneemengen quantifizieren zu können, wird die Schneehöhe im Projektbereich gemessen. Hierfür werden zwei Laserscanner Riegl LPM-i800HA und Laserscanner Riegl LPM-2K, die den festgelegten Bereich vom gegenüberliegenden Hang beobachten und laufend die Schneehöhe über Entfernungsmessung erfassen eingesetzt.



4.3 Verwendete Software

Wind-Strömungsmodell: Finite Elemente Software Comsol (Femlab 3.1.i)

Die Simulationssoftware FEMLAB (Finite Element Modeling Laboratory) wird zur Entwicklung eines Wind-Strömungsmodell eingesetzt.

Wind-Strömungsmodell: meteorologisches Modell ARPS (Advanced Regional Prediction System, University of Oklahoma)

Mat. Lab 6.5:

Schnittstellenprogrammierung für ein Geländedatenimport – Tool

Berechnung der Schneehöhendifferenzen

Alpine3D (Inklusive SNOWPACK), Schneeverfrachtungssimulation entwickelt am Eidgenössischen Institut für Schnee und Lawinenforschung in Davos (Gruppe: Michael Lehning)

Laserscanner: RIPROFILE

Zur Aufnahme von Daten mit dem Laserscanner der Firma Riegl Laser Measurement Systems GmbH benötigt man deren Software RIPROFILE

GIS-Plattform ArcView 3.2 (GIS) und ARC-GIS 9

Die Verwaltung der topographischen Datengrundlagen sowie die Datenverarbeitung der vom Laserscanner generierten Punktwolken erfolgt mit der Gis-Software ArcView und ARC-GIS 9

Windmessung: GILL Wind Sonic

Zur Datenaufnahme mit dem mobilen Windmessgerät der Firma Kroneis kam die passende Software GILL Wind Sonic zum Einsatz

Sonstige Programme

Global Mapper 5, SURFER, EXCEL 2000, COREL DRAW 10, WORD 2000



5 ALLGEMEINE GEBIETSDESCHEIBUNG

5.1 Lage des Projektgebiets

Die Auswahl des Projektgebiets erfolgte gemeinsam mit dem Auftraggeber, für die Bearbeitung der fachlichen Fragestellungen ist jeder Hang geeignet, der eine inhomogene Verteilung der flächigen Schneehöhen aufweist, die durch Schneeverfrachtung hervorgerufen wurde. Das Projektgebiet liegt in der Gemeinde Lech am Arlberg, Vorarlberg.

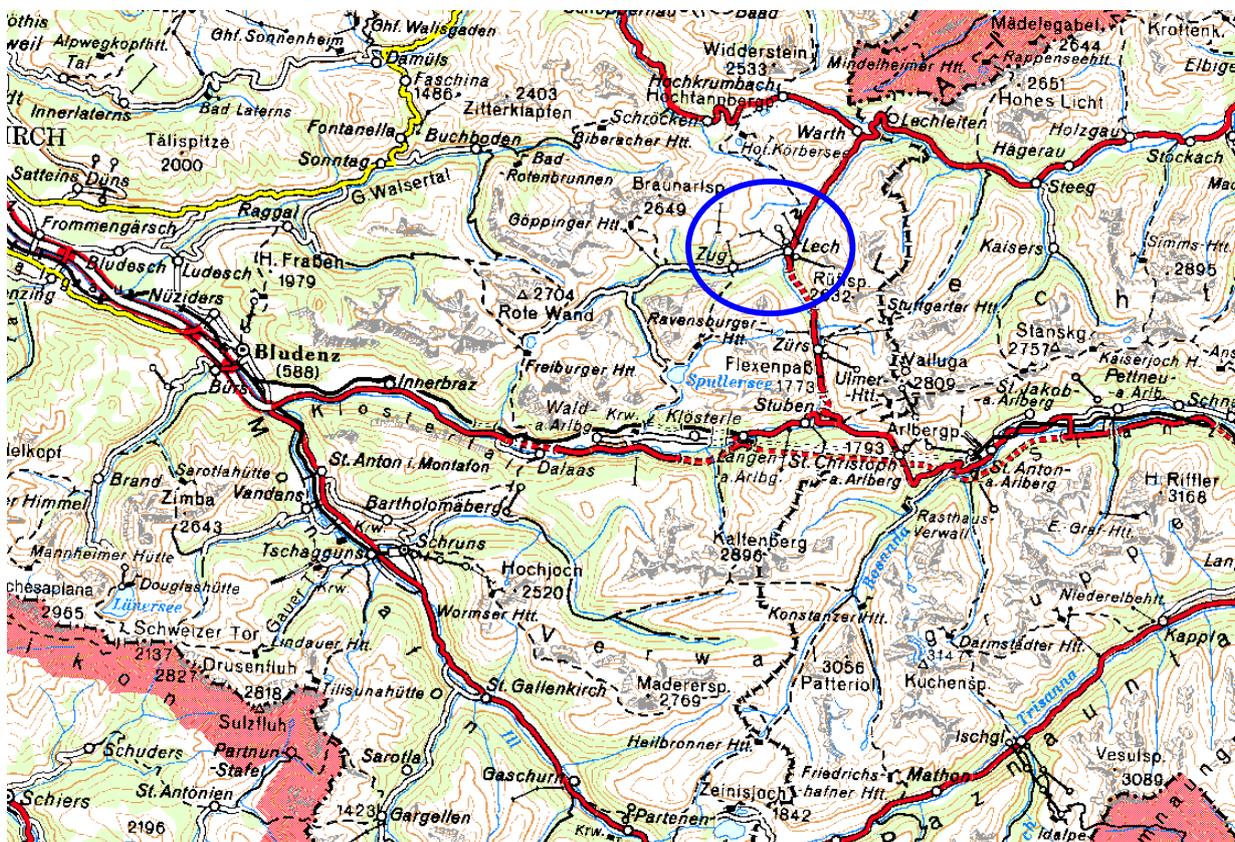


Abbildung 1: Übersichtsdarstellung des Projektgebiets (Ausschnitt aus der ÖK200, verkleinert M: 1:500.000 verkleinert)



Das Projektgebiet umfasst den Bereich der Stützverbauungen am Kriegerhorn. Dort werden sämtliche Daten für die Erfassung der Schneedeckenparameter aufgenommen. Für die Simulation der Windströmung dehnt sich das Projektgebiet aus. Auch die umliegenden Berge um das Kriegerhorn müssen in die Berechnungen einbezogen werden, da diese die Windströmung maßgeblich beeinflussen.

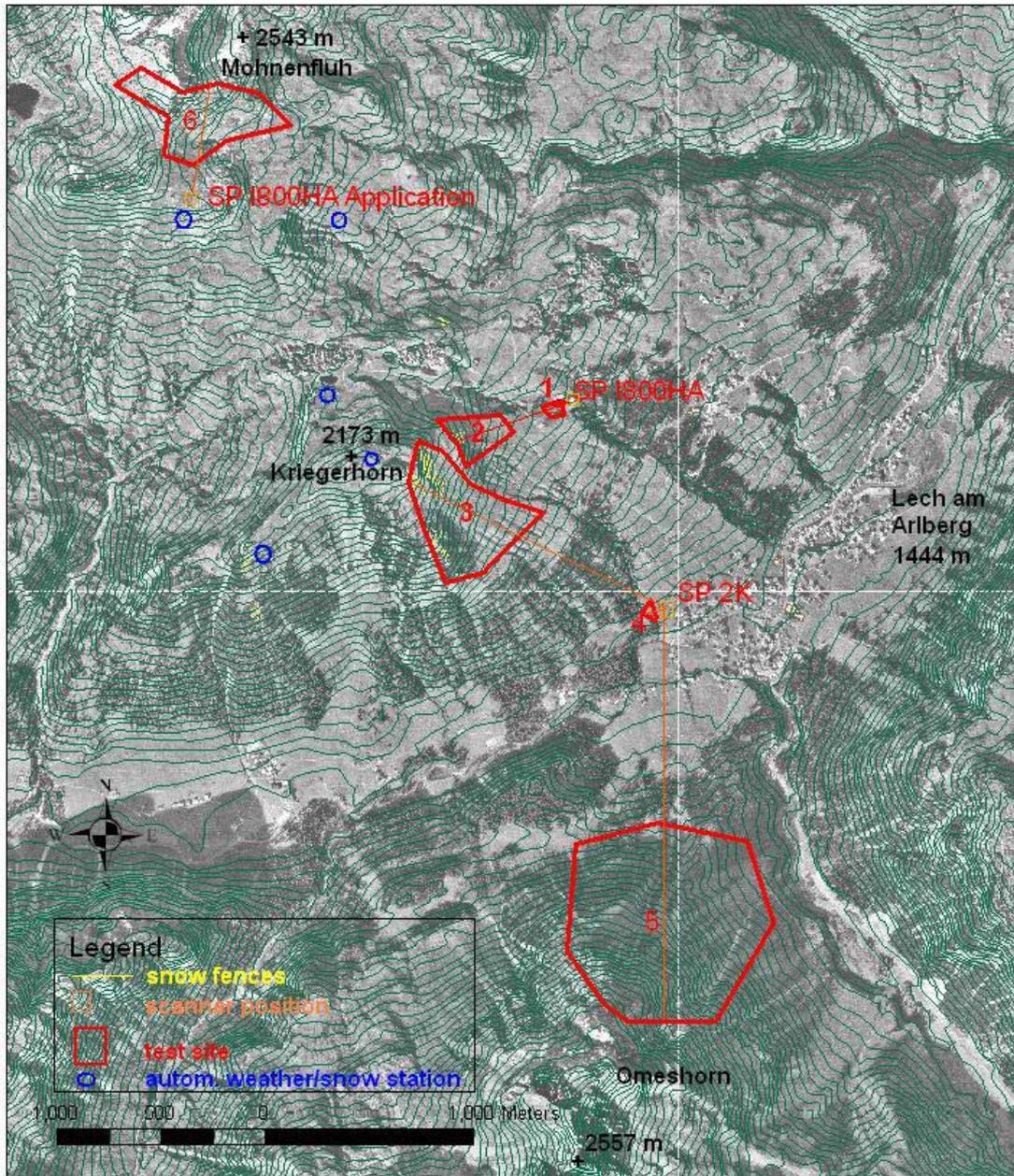


Abbildung 2: Übersichtsdarstellung des Projektgebiets (Ausschnitt aus Orthofotos des Gemeindegebietes von Lech am Arlberg, Schneehöhenmessung mit dem LPM-i800HA (Testgebiete 1,2, 6) Schneehöhenmessung mit dem LPM-2K (Testgebiete 3,4,5))



6 SCHNEEVERFRACHTUNGSMODELLIERUNG

Um für das Untersuchungsgebiet eine Schneehöhenverteilung berechnen zu können wird ein gekoppelter Modellansatz gewählt werden (vergleiche Abb. 6.1). Durch die Kopplung mehrerer Modelle sollen alle an der Schneeoberfläche stattfindenden Oberflächenprozesse behandelt werden. Das Grundgerüst der Verfrachtungssimulation wird durch die Windfeldberechnung gebildet. Es werden dynamisch und thermisch induzierte Strömungen in einer sehr hohen Auflösung mittels eines meteorologischen Modells ARPS (Advanced Regional Prediction System) berechnet. Das Modell ermöglicht es durch die Topographie bedingte mikroskalige Strömungsmuster nachzubilden und thermisch bedingte, synoptiskalige Strömungsmuster, beeinflusst durch die Großwetterlage, zu simulieren. Als Output erhält man für jede Gitterzelle einen dreidimensionalen Windgeschwindigkeitsvektor, der die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung beinhaltet. Zusätzlich erhält man Information über den Grad der Turbulenz für jeden Gitterpunkt. Der Grad der Turbulenz ist in erster Linie für die Berechnung der Suspension von Bedeutung. Durch die Berücksichtigung der Thermik werden für jeden Gitterpunkt potentielle Temperatur, Druck und Feuchtigkeitskoeffizienten berechnet. Das Strömungsmodell rechnet mit einem dreidimensionalen und orographiefolgenden Gitter. Hierbei werden Strömungen in Bodennähe mit der größten Auflösung behandelt. Die berechneten Windgeschwindigkeiten und Turbulenzwerte gehen in ein nachgeschaltetes, übergeordnetes Modell ALPINE3D ein. Zu jedem Zeitpunkt wird das Modell ALPINE3D mit durch ein stationäres Windfeld initialisiert. Dieses Modell wurde am Eidgenössischen Institut für Schnee und Lawinenforschung Davos (WSL, SLF) speziell entwickelt um den komplexen Wechselwirkungen zwischen Schnee und Atmosphäre gerecht zu werden. Für die Anforderung dieser Arbeit wurden im Modell drei wesentliche Module, Schneedeckenmodell, Energiebilanzmodell und Verfrachtungsmodell gekoppelt. Das gekoppelte Modell erhält den Input aus dem Strömungsmodell. Das Schneedeckenmodell stellt dabei das Herzstück des Modellgerüsts dar. In vielen anderen Verfrachtungsmodellen [Liston et al., 2007], [Gauer 2001], vergleichbarer Komplexität, werden die Schneedeckeneigenschaften nur ungenügend berücksichtigt. Für die korrekte Berechnung der Verfrachtung aber auch



zur Abschätzung der Lawinengefahr ist eine Behandlung des Schneedeckenaufbaus und der Schneedeckeneigenschaften unerlässlich. Das Untersuchungsgebiet stellt ein komplexes Gelände dar. Mit zunehmender Komplexität des Geländes nimmt der Einfluss der Topographie auf die Strahlungsbilanz zu. In Abhängigkeit der Inklination und Exposition wird über ein dreidimensionales Energiebilanzmodell für jede Gitterzelle eine eigene Energie- und Strahlungsbilanz berechnet. Im entsprechenden Modul werden die Streuung der kurzwelligigen Strahlung und die Emission der langwelligigen Strahlung durch umliegende Objekte berücksichtigt. Der räumlich differenziert berechnete Energieeintrag beeinflusst im Weiteren die Mikrostruktur der Schneedecke sowie die Schneedeckenentwicklung. Die Schneedeckeneigenschaft bestimmt die Erodibilität der Schneedecke an jedem Punkt und beeinflusst damit wesentlich den Massentransport. Die Schneedeckeneigenschaften, insbesondere Kornform und Korngröße, bestimmen die kritische Schubspannung der Strömung. Aus diesem Grund ist es notwendig den Schneedeckenaufbau sowie deren Entwicklung in einem gesonderten Modul zu berechnen. Das Schneedeckenmodell SNOWPACK ist ein eigenständiges, physikalisch basiertes, eindimensionales, numerisches Energie- und Massenbilanzmodell. Die Parametrisierung der Schneeeigenschaften erfolgt dabei über die Berechnung der Schneemikrostruktur, näher durch die Berechnung der Metamorphoseprozesse. Die mikrostrukturellen Schneedeckeneigenschaften werden beschrieben durch Kornform, Korngröße, Porengröße, Bindung, Dendrizität und Spherizität. Zusätzlich wird der Einfluss der Mikrostruktur auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften durch thermische Wärmeleitung und Viskosität des Schnees beschrieben. Im Weiteren wird der Phasenwechsel, Wassertransport und Wasserdampftransport berechnet. Neben mikrostrukturellen Eigenschaften des Schnees kann auch für jeden Punkt die Stabilität der Schneedecke über einen Stabilitätsindex berechnet werden. Die Schneeverfrachtung selbst wird über ein Transportmodul Driftmodul berechnet. Für jeden Zeitschritt wird die Schneedecke initialisiert und in Abhängigkeit der berechneten Schneedeckeneigenschaften wird eine kritische Schubspannungsgeschwindigkeit berechnet, ab welcher der Saltationsprozess einsetzen kann. Dieser Wert wird an das Verfrachtungsmodell übergeben. Wird dieser Schwellenwert überschritten kann die Verfrachtung einsetzen. Je nach dem Grad der Turbulenz findet die Verfrachtung in Form von Saltation und Suspension statt. Das



Verfrachtungsmodul, bestehend aus einem Saltations- und ein Suspensionsmodul, berechnet die Umverteilung des bereits abgelagerten Schnees durch das Saltations- und Suspensionsmodul sowie die räumliche Verteilung des fallenden Niederschlags durch das Suspensionsmodell.

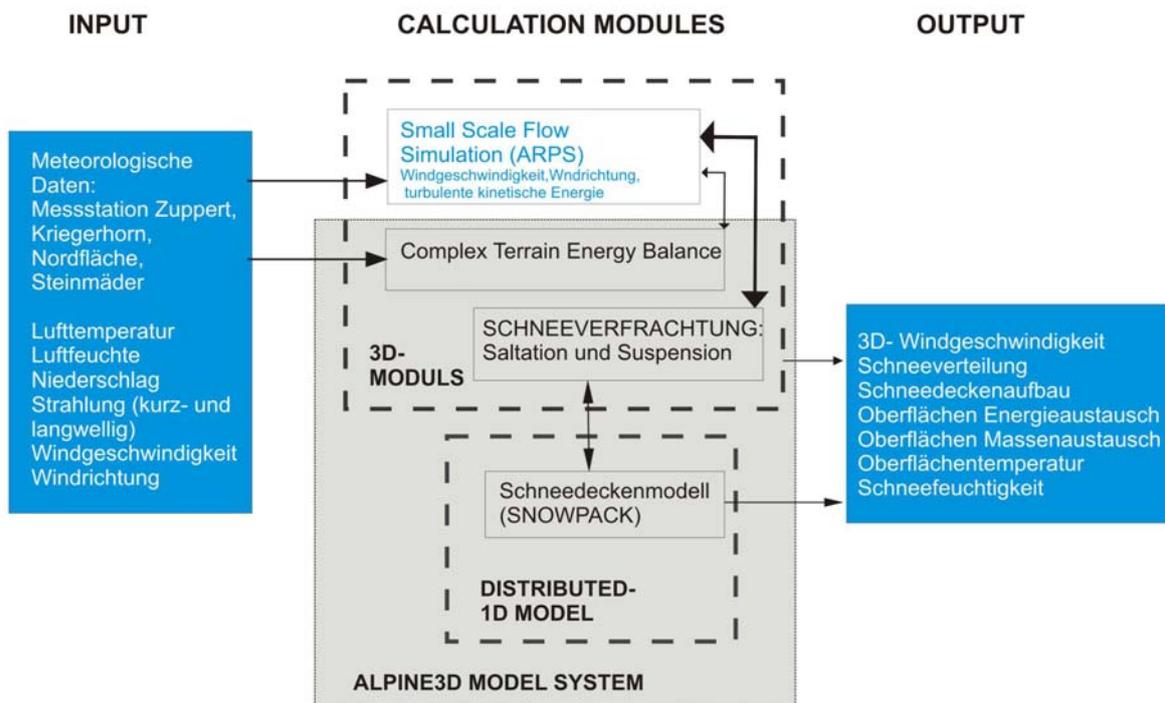


Abbildung 6.1: Modellaufbau und Modellkopplung

6.1. Modellkoppelung und Methodik

Die horizontale Auflösung für die Berechnung der Schneeverfrachtung sowie der zeitlichen und räumlichen Schneedeckenentwicklung beträgt 25 m für den Gesamtraum und 5 m für das Gebiet Mohnenfluh, welches die besten flächigen Schnehöhendaten für die Evaluierung der Modelle durch die Laserscannmessung bereitstellt. Die Gebietsgröße für die Verfrachtungsmodellierung des Gesamtraumes beträgt in etwa 3.1 x 3.7 km. Die Gebietsgröße für die Berechnung des Windfeldes beträgt 4.3 x 5 km. Das Rechengebiet für das Windfeld muss größer gewählt werden da der Einfluss der umliegenden Topographie berücksichtigt und möglichst hinreichend nachgebildet



werden muss. Das Rechengitter der Windfeldberechnung für das Gebiet Mohnenfluh umfasst eine Fläche von 1.8 x 2 km. Aufgrund dieser Vielzahl von zu berechnenden Gitterzellen und dem sehr kleinen internen Zeitschritt von 0,01 Sekunde bei der Windfeldberechnung kann das Strömungsmodell nicht für den gesamten Winter berechnet werden. Aus diesem Grund werden für den Zeitschritt von einer Stunde konstante atmosphärische Bedingungen angenommen.

Hierfür wurden Windmessungen an vier Standorten statistisch ausgewertet. In Abbildung 6.3 ist die Verteilung der Windrichtung für die Messstandorte Zuppert, Nordfläche, Kriegerhorn und Steinmäder anhand von Windrosen dargestellt. Die Darstellung zeigt im Messwinter 2006/07 eine Dominanz der Nordwinde am Standort Nordfläche. Für den Standort Zuppert liegt die primäre Hauptwindrichtung bei Südwest- bis West. Sekundärmaxima liegen bei Süd und Nord. Als primäre Hauptwindrichtung am Kriegerhorn kann der Westwind und Südwestwind ausgewiesen werden. Diese Windmessungen stellen sehr lokale Messungen dar. Die gemessenen Werte inkludieren die Beeinflussung der Topographie, was sich vor allem durch die starke Divergenz der vier Standorte zueinander zeigt. Zusätzlich werden die Messergebnisse bestimmt durch die Thermik der Strömung und durch die Großwetterlage. In Abhängigkeit der vorherrschenden Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten während des Winters 2007 wurden Hauptwindrichtungen ermittelt und 16 Großwetterklassen mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten gebildet.

Windfelder für Hauptwindrichtungen und unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen werden bis zur Stationarität gerechnet. Ziel ist es bei der Initialisierung der Windfelder mit der Großwetterlage die lokalen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an den Referenzstandorten zu reproduzieren. Für die Simulationsperiode wird jedem Zeitschritt (1 Stunde) ein Windfeld zugeordnet. Als Output von ARPS werden die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten und die turbulenten kinetischen Energie für jede Gitterzelle als Input für das Verfrachtungsmodell verwendet. Wie schon zuvor erwähnt dient das orographiefolgende Rechengitter auch als Gitter für die Berechnung der Suspension. Für die Kopplung der Modelle wird als erster Schritt für jeden Zeitschritt die Schneedecke initialisiert und in Abhängigkeit der Schneedeckeneigenschaften die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für jede Gitterzelle berechnet. Wird dieser



Schwellenwert überschritten, so wird die Saltation für jeden Gitterpunkt gerechnet. Dies stellt die untere Randbedingung für das Suspensionsmodell dar. Im Suspensionsmodell wird in Folge für die vorherrschenden Wind- und Saltationsbedingungen die Partikelkonzentration für jeden Gitterpunkt des orographiefolgenden Gitters berechnet bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Als laterale und obere Randbedingung wird dem Suspensionsmodell der Niederschlagswert übergeben. Die untere Randbedingung ergibt sich aus der Partikelkonzentration und dem Input aus der darunterliegenden Saltationsschicht. Als Folge der Berechnungen im Saltations- und Suspensionsmodell wird die Erosion und Deposition von Schnee berechnet und dem Schneedeckenmodell übergeben. Die Schneedeckenbeschaffenheit wird durch die neu berechneten Elemente initialisiert und die Energie- und Massenbilanz innerhalb des Schneedeckenmodells berechnet. Der Endzustand jedes Zeitschrittes ist der Initialzustand für den nächsten Zeitschritt, in welchem Saltation und Suspension in Abhängigkeit eines neuen stationären Windfeldes und der neu initialisierten Schneedeckeneigenschaften berechnet wird [Lehning et al., 2000].

8

2.3. MODELLIERUNG DES STRÖMUNGSFELDES

2.3 Modellierung des Strömungsfeldes

Für die kleinskalige Modellierung der atmosphärischen Strömung in alpinem Gelände wird das meteorologische

Modell ARPS verwendet. ARPS wurde an der Universität Oklahoma (Center for Analysis

and Prediction of Storms, CAPS) für die Prognose von Wirbelstürmen des Nordamerikanischen

Mittleren Westens entwickelt. Nach zahlreichen Weiterentwicklungen des Modells können nun Luftstr

ömungen über alpinem Gelände berechnet werden. Im Folgenden wird das Modell in den wesentlichen



Grundzügen beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet sich in Xue et al.

(2000a) und Xue et al. (2000b).

Durch die Wahl eines kartesischen Koordinatensystems würde sich die numerische Behandlung des

unteren Modellrandes, vor allem in stark reliefiertem Gelände, stark erschweren. Somit wird, wie in den

meisten Strömungsmodellen, für die Koordinatentransformation ein orographiefolgendes Koordinatensystem

eingesetzt. Hierbei wird der untere Modellrand durch die Topographie bestimmt. Das Rechengitter

ist orthogonal in der Horizontalen. In der Vertikalen wird das Rechengitter gestreckt um dem Gelände zu

folgen. Die vertikalen Abstände der einzelnen Rechenschichten werden in Bodennähe kleiner gewählt.

Dadurch wird in Bodennähe die herrschende höhere Dynamik des Windfeldes besser reproduziert. Mit

zunehmender Höhe gleichen sich die vertikalen Schichten zunehmend dem kartesischen Koordinatensystem

an. An Graten und Gipfeln ist der vertikale Abstand des Gitters der ersten Schicht kleiner als in

flachem Gelände. Das Windfeld wird für 50 Ebenen bis zu einer Höhe von 4500 m über der Topographie

berechnet (siehe Abbildung 2.2. Als numerisches Gitter wird ein geschachteltes Gitter (staggered grid),

staggered Arakawa C- Grid, verwendet. Dieses wird durch orographiefolgende Koordinaten definiert.



Die Modellvariablen sind hierbei jeweils um eine halbe Gitterweite r räumlich gegeneinander verschoben.

Zur Diskretisierung der Modellgleichung wird die Methode der finiten Differenzen verwendet, so dass

kompresible Strömungsprobleme durch die kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen gelöst werden

können. Die diskreten Modellvariablen werden über einen entsprechenden Gitterindex (i,j,k) angesprochen.

Die horizontalen Windkomponenten u und v werden hierbei jeweils in der Mitte der Seiten, die Vertikalkomponente

w jeweils in der Mitte des unteren und oberen Randes der Fläche und das Geschwindigkeitspotentials

der Strömung im Mittelpunkt der Gitterzelle lokalisiert. Aufgrund dieser Anordnung der Variablen fließen in das Modell für die Korrekturwerte für die Windkomponenten der Gradient des Geschwindigkeitspotentials

und nicht der aktuelle Wert ein. In Folge der Methode der finiten Differenzen

wird durch die Diskretisierung der Modellvariablen auf einem geschachtelten Modellgitter die Genauig-

9

KAPITEL 2. MODELLE

keit der Ergebnisse erhöht. Mit Hilfe dieses Ansatzes können die Erhaltungssätze von Impuls, Energie,

Masse, turbulenter kinetischer Energie (TKE) und die Gleichung für den Status der Luftfeuchtigkeit gelöst

werden. Außerdem inkludiert ARPS weitere Modelle für atmosphärische Strömung. Ein Strahlungsmodell

und ein mehrschichtiges Bodenmodell (Landnutzungsklassen) können zugeschaltet werden.



Die Modellvariablen werden definiert als die Summe der base state Variablen und der Abweichungen

vom base state. Der base state stellt den Initialzustand des Modells dar. Im Modell wird das initiale Windfeld

als horizontal homogen, zeitlich invariant und hydrostatisch ausgeglichen definiert. Die horizontale

Homogenität an der einzelnen Rechenschichten ermöglicht es den Druckgradienten zu vernachlässigen,

so dass numerische Fehler aufgrund des orographiefolgenden Koordinatensystems verhindert werden

können. Um die turbulenten Strömungen zu berechnen wurde ARPS als eine Large Eddy Simulation

Modell entwickelt. Nach diesem Ansatz werden die großskaligen Wirbelstrukturen explizit über ein

dreidimensionales Modell gelöst. Die kleinskaligen, sprich subgridskaligen Strukturen, werden über ein

Turbulenzmodell, dem Subgrid scale (SGS) model, parametrisiert, so dass auch Phänomene extrem

kleiner Zeitschritte und feiner Gitter korrekt gelöst werden können. Das SGS Modell wird gekoppelt mit

dem 1.5 order TKE basierte turbulent closure mode nach Smagorinsky [Smagorinsky 1962] um die für

Turbulenzen wichtigen horizontalen und vertikalen Mischkoeffizienten für Impuls zu determinieren. Für

die Parametrisierung der Turbulenz in weiterführenden Schneesverfrachtungsmodellen kann die turbulente

kinetische Energie als Output von ARPS verwendet werden [Xue et al., 2000].



Um für das Projektgebiet ein Windströmungsmodell erstellen zu können, müssen verschiedene Arbeitsschritte durchgeführt werden. Zuerst werden die Windverhältnisse der Winterzeit analysiert. Hierbei werden Fallbeispiele für die Simulation der Windverhältnisse ermittelt. Eingangswerte für Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden somit für die Modellbildung bereitgestellt (siehe Zwischenbericht Rep. 106, November 2005).

Im ersten Schritt dieses Projektes wurde ein Windströmungsmodell mittels der finiten Elemente Software „Femlab“ entwickelt, das allerdings ein reines Strömungsmodell darstellt, also den Windströmungsverlauf über die vorgegebene Topographie berechnet. Nicht in diesem Modell enthalten sind die thermischen Windbewegungen die aufgrund etwa höhenbezogen unterschiedlicher Temperaturen vorherrschen. Um diesem Umstand aber gerecht zu werden und um über bessere Mittel zur Berechnung der Windströmungssituation ausgehend von Großwetterlagen in kleiner aufgelöste Gebiete zu besitzen, wurde in einem zweiten Schritt die Modellierung der Windverhältnisse mit dem Modell „ARPS“ (Advanced Regional Prediction System) der University of Oklahoma vorgenommen. Hierfür müssen sämtliche physikalische Bedingungen für die Modellbildung überprüft werden. Zusätzlich wird ein Werkzeug geschaffen, mit dem es möglich ist, die Geländeoberfläche, die in üblicher Rasterform vorliegt in die Geometrie der Software einzuarbeiten.

Auch im zweiten Messwinter wurden Windmessungen mittels der permanenten Windmessstationen sowie manuelle Messungen im Gelände in gleicher Art und Weise wie im ersten Messwinter durchgeführt (siehe Zwischenbericht Rep. 106, November 2005). Diese Messungen sind weiterhin notwendig um bessere Grundlagen einerseits für die Bereitstellung von Eingangswerten für die Simulation und andererseits für die Evaluierung der Ergebnisse der Windströmungsmodellierung zu besitzen.

.



6.1 Modellbeschreibung ARPS

6.1.1 Einführung

Um die Einwirkung der Schneeverfrachtung auf die Entwicklung des kleinräumigen Schneedeckenaufbaus in komplexem Gelände berechnen zu können, wird die atmosphärische Strömung innerhalb der planetaren Grenzschicht anhand des mesoskaligen numerischen Strömungsmodells Advanced Regional Prediction System (ARPS) modelliert. Mit diesem Modell sollen vor allem dynamisch induzierte mesoskalige Strömungen in alpinem Gelände, welche als Folge der Interaktion zwischen Luftströmung und Bodenoberfläche auftreten, reproduziert werden. Die Ergebnisdaten dieser Simulation ermöglichen es in weiterer Folge eine für die Abschätzung der Lawinengefahr hilfreiche Modellierung der kleinskaligen Schneeverfrachtung, welche für jedes nachgeschaltete Schneedeckenmodell als wesentlicher Inputparameter einfließt, zu berechnen.

6.1.2 Modellbeschreibung

Für die kleinskalige Modellierung der atmosphärischen Strömung in komplexem Gelände wird das meteorologische, non hydrostatische und kompressible Modell ARPS verwendet, um hochauflösende Windfelder berechnen zu können. Ursprünglich wurde das meteorologische Modell in den 1990`s an der Universität Oklahoma (Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS) entwickelt um Wirbelstürme des Nordamerikanischen Mittleren Westens hervorzusagen. Nach zahlreichen Weiterentwicklungen ist das Modell nun im Stande Luftströmungen über alpinem Gelände zu berechnen. Dies bedeutet, dass nun an das Modell der Anspruch gestellt wird auch typische in der Natur beobachtete Strömungsmuster in orographisch gegliedertem Gelände wie Wirbelbildungen im Lee, die Ablösung der Hauptströmung (*boundary layer separation*) mit damit verbundener rückläufigen Strömung in



Bodennähe, im Lee eines Hindernisses sowie ein Aufstauen und Stagnieren der Strömung (*blocking effect*) und Ausbildung von Schwerewellen in Form von Fallwinden während Föhnwetterlagen im Luv nachbilden zu können. Der Einfluss der Orographie auf das Strömungsfeld kann auch durch den Kanalisierungseffekt in ausreichend breiten Tälern, sprich die talparallele Ausrichtung der großräumigen Strömung, beschrieben werden.

Im Weiteren ist ARPS im Stande eine mit Ansteigen des Hindernisses charakteristische Beschleunigung der Windgeschwindigkeit, welche aus der zunehmenden Verringerung der vertikalen Abstände zwischen Strömungslinien resultiert, in Form des *speed up* zu berechnen.

Durch die Wahl eines kartesischen Koordinatensystems würde sich die numerische Behandlung des unteren Modellrandes, vor allem in stark reliefiertem Gelände, stark erschweren. Somit wird wie in den meisten Strömungsmodellen für die Koordinatentransformation ein orographiefolgendes Koordinatensystem eingesetzt. Hierbei wird der untere Modellrand durch die Topographie bestimmt. Das Rechengitter ist orthogonal in der Horizontalen und gestreckt in der Vertikalen um dem Gelände zu folgen. Die vertikalen Abstände der einzelnen Rechenschichten werden in Bodennähe kleiner gewählt um die dort herrschende höhere Dynamik des Windfeldes besser reproduzieren zu können. Mit zunehmender Höhe gleichen sich die vertikalen Schichten zunehmend dem kartesischen Koordinatensystem an.

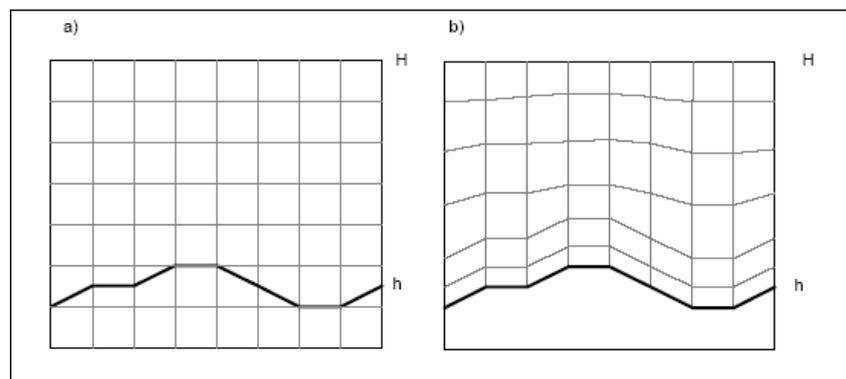


Abbildung 3: Koordinatentransformation: orographiefolgendes Koordinatensystem



Als numerisches Gitter wird ein geschachteltes Gitter (*staggered grid*), *staggered Arakawa C – grid*, verwendet. Dieses wird durch orographiefolgende Koordinaten definiert. Die Modellvariablen sind hierbei jeweils um eine halbe Gitterweite räumlich gegeneinander verschoben. Zur Diskretisierung der Modellgleichung wird die Methode der finiten Differenzen verwendet, so dass kompressible Strömungsprobleme, durch die kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen gelöst werden können. Die diskreten Modellvariablen werden über einen entsprechenden Gitterindex (i,j,k) angesprochen.

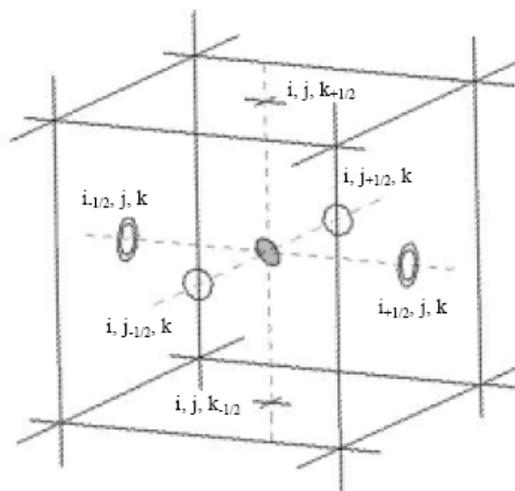


Abbildung 4: Anordnung der Modellvariablen auf einem geschachtelten Gitter

Die horizontalen Windkomponenten u und v werden hierbei jeweils in der Mitte der Seiten, die Vertikalkomponente w jeweils in der Mitte des unteren und oberen Randes der Fläche und das Geschwindigkeitspotential der Strömung im Mittelpunkt der Gitterzelle lokalisiert. Aufgrund dieser Anordnung der Variablen fließen in das Modell für die Korrekturwerte für die Windkomponenten der Gradient des Geschwindigkeitspotentials und nicht der aktuelle Wert ein. In Folge der Methode der finiten Differenzen wird durch die Diskretisierung der Modellvariablen auf einem geschachtelten Modellgitter die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht.



Mit Hilfe dieses Ansatzes können die Erhaltungssätze von Impuls, Energie, Masse, turbulenter kinetischer Energie (TKE) und die Gleichung für den Status der Luftfeuchtigkeit gelöst werden. Außerdem inkludiert ARPS weitere Modelle für atmosphärische Strömung. Ein Strahlungsmodell und mehrschichtiges Bodenmodell (Landnutzungsklassen) können aktiviert werden.

Die Modellvariablen werden definiert als die Summe der *base state* Variablen und der Abweichungen vom *base state*.

Im Modell wird die *Base state* als horizontal homogen, zeitlich invariant und hydrostatisch ausgeglichen definiert. Die horizontale Homogenität der einzelnen Rechenschichten ermöglicht es den Druckgradient zu vernachlässigen, so dass rechnerische Fehler aufgrund des orographiefolgenden Koordinatensystems verhindert werden können.

Um die turbulenten Strömungen zu berechnen, wurde ARPS als eine Large – Eddy Simulation Modell entwickelt. Nach diesem Ansatz werden die größerskaligen Wirbelstrukturen explizit über ein dreidimensionales Modell gelöst. Die kleinskaligen, sprich sub-gridskaligen Strukturen werden über ein Turbulenzmodell, dem *Subgrid scale (SGS) model* parameterisiert, so dass auch Phänomene extrem kleiner Zeitschritte und feiner Gitter korrekt gelöst werden können. Das SGS Modell wird gekoppelt mit dem *1.5 order TKE* basierte *turbulent closure mode* nach Smagorinsky, um die für Turbulenzen wichtigen horizontalen und vertikalen *mixing coefficients* für Impuls zu determinieren. Für die Parametrisierung der Turbulenz in weiterführenden Schneeverfrachtungsmodellen kann die turbulente kinetische Energie als Output von ARPS verwendet werden.



6.1.3 Set-up des Modells

Wie aus Abb.3 zu sehen ist, besteht ein Modelldurchlauf mit ARPS sowie die Zuschaltung von zusätzlichen Submodellen aus einer Vielzahl von einzelnen Routinen und Subroutinen. Hier sollen nun lediglich die wesentlichsten Schritte mit den dazugehörigen Inputparametern aufgelistet werden.

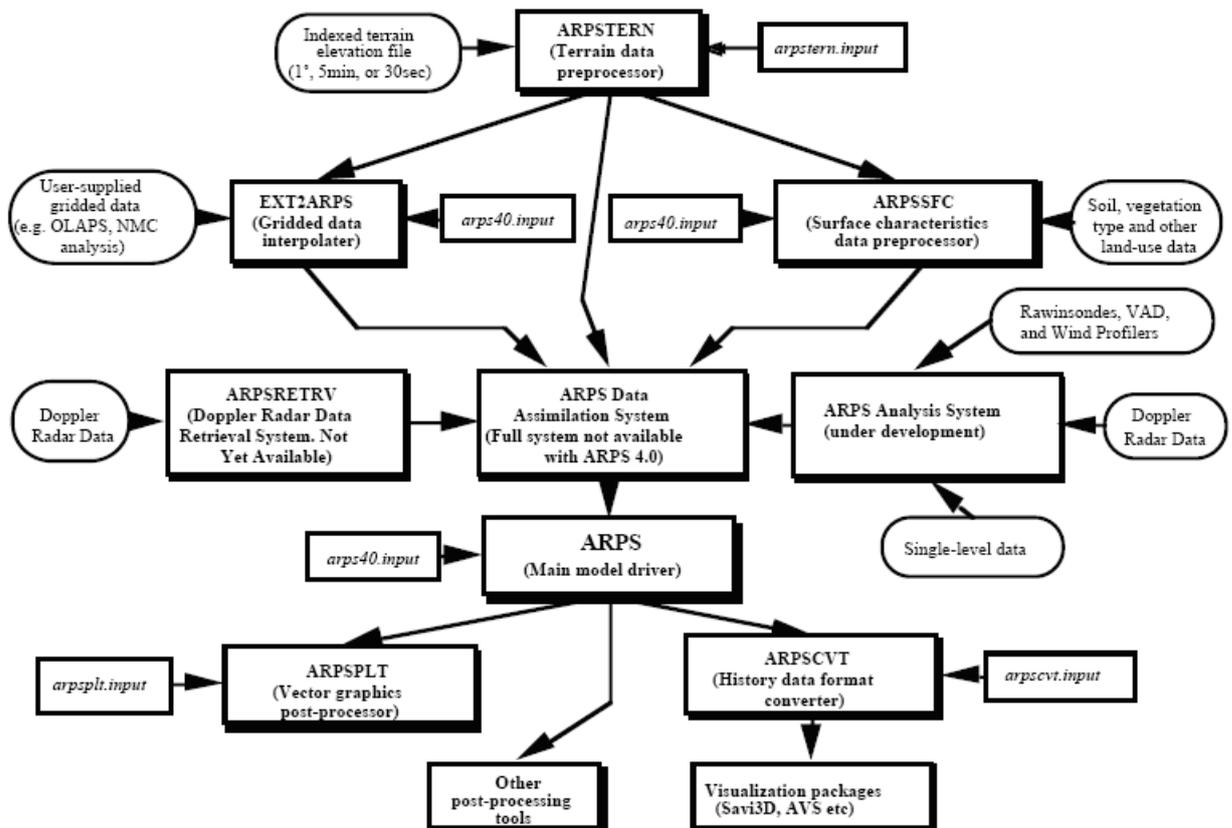


Abbildung 5: ARPS modell process flow

Als Eingangsdaten benötigt ARPS die topographische Information in Form eines digitalen Höhenmodells, wobei die horizontale Auflösung des Grids bisher bis zu 25m als sinnvoll erachtet werden kann.



6.1.3.1 Initialisierung des Modells

Die Initialisierung des *base state* Windfeldes kann durch eine analytische Funktion oder durch ein externes *Sounding* erfolgen.

Im Falle eines analytischen atmosphärischen Profils wird dem Modell ein vertikales Profil der Parameter potentielle Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung als Input gegeben woraus ein numerisches *Sounding* angepasst an das der Orographie folgenden Koordinatensystems interpoliert wird und durch *base state* Variablen definiert wird. Zum Zeitpunkt des *base state* wird jede Rechenschicht als horizontal homogen betrachtet.

Die Initialisierung durch ein externes Sounding erfolgt durch die Methode *nesting*. Hierbei wird dem mesoskaligen Modell der Zustand und die Veränderung der übergeordneten Skala mitgeteilt. Es erfolgt ein *nesting* zwischen Modellen unterschiedlicher Auflösungen. Dabei werden die Ergebnisdaten eines größerskaligen Modells direkt als Randbedingung eines kleinerskaligen Modells übernommen.

Durch eine Differenzierung zweier unterschiedlicher Zeitschritte werden Phänomene unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Skalen differenziert behandelt. Der *acoustic wave mode* wurde übernommen in dem ein kleiner Zeitschritt von 0.001s verwendet wird. Die größerskaligen Wirbelstrukturen werden über den großen Zeitschritt von 0.01s berechnet.

6.1.3.2 Behandlung der Modellränder

Sieht man von der Erdoberfläche als unteren Modellrand ab, stellen die Ränder keine echten Grenzen dar. Das Rechengebiet muss mit einem Zellrand versehen werden, dessen Werte explizit gesetzt werden. Da ein mesoskaliges Modell immer eine Reaktion auf die Prozesse der übergeordneten Skala beschreibt, müssen die Ränder so gesetzt werden, dass das Strömungsverhalten über die Ränder hinaus realistisch abgebildet werden kann.

Hierfür bietet ARPS einige Möglichkeiten an Randbedingungen für den unteren, oberen und die lateralen Modellränder an. Angepasst an die Topographie des Rechengebietes sowie an die Fragestellung muss die geeignete Randbedingung gefunden werden.



- Obere und untere Randbedingungen

Mögliche Randbedingungen sind:

- Rigid top lip (undurchlässiger Boden)
- Periodic
- Zero -normal gradient

Für die obere Randbedingung wird *Zero-normal gradient* gewählt. Hierdurch wird die obere Grenze als undurchlässig behandelt. Um den Massenfluss über den oberen Rand hinaus zu verhindern, müssen die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zum Modellrand gleich Null sein.

Für den unteren Rand des Rechengebietes wird die Option *rigid wall* gewählt, wodurch der untere Modellrand aufgrund der Erdoberfläche ebenfalls keine Massenflüsse zulässt. Ist das Gelände nicht flach wird die vertikale Windkomponente w am Boden nicht auf Null gesetzt.

- Laterale Randbedingungen

Mögliche Randbedingungen in ARPS:

- Wall (mirror) boundary condition
- Periodic boundary condition
- Zero – normal gradient condition
- Open radiative boundary condition
- External specified boundary condition (z.Bsp. nesting)

Für das Untersuchungsgebiet wurden für alle 4 lateralen Modellränder periodische Randbedingungen gewählt. Die periodischen Randbedingungen geben vor, dass sich außerhalb des Rechengebietes die Lösung unendlich wiederholt. Die Lösung in der Distanz von d links des Modellrandes ist dabei gleich der Lösung eines Punktes mit der Distanz d links des rechten Randes.



6.1.4 Downscaling – Nesting: Generierung von externen Soundings anhand des aLMo – Modell Outputs

Um die Initialisierung des atmosphärischen Modells ARPS zu optimieren sowie die Möglichkeit zu schaffen reale Vorhersagen für kleinskalige Gebiete modellieren zu können, wurde eine neue Methode des *downscaling* entwickelt. Basierend auf der vertikalen Struktur der Atmosphäre kann das numerische Wettervorhersagemodell aLMo (*Alpine Model of MeteoSwiss*) als größerskaliges Modell verwendet werden, um in Folge ein nesting durchzuführen um die Ergebnisdaten als Randbedingung des ARPS-Grids für ein ausgewähltes Gebiet zu verwenden. Dieses numerische Wettervorhersagemodell basiert auf einem Satz von physikalischen Gesetzen, geeigneten Anfangs- und Randbedingungen und einer numerischen Methode, um mit dem System von Gleichungen die zeitliche Entwicklung vorzuberechnen. Das Modellgebiet umfasst ganz West- und Mitteleuropa. Die horizontale Auflösung von aLMo beträgt 7 km. Diese horizontale Auflösung ist im Vergleich zu anderen atmosphärischen Modellen sehr gering. aLMo rechnet 45 vertikale Rechenschichten, wobei 10 dieser Schichten in den ersten 1500 m über der Topographie gerechnet werden um die Wetterverhältnisse innerhalb der planetaren Grenzschicht besser abdecken zu können. Als Randbedingungen verwendet aLMo die Vorhersagen des globalen Modells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) in Reading (GB). Die Output Parameter des Modells aLMO sind Luftdruck, Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.



6.1.5 Bisherige Modellergebnisse

6.1.5.1 Wetterlage: Südföhn

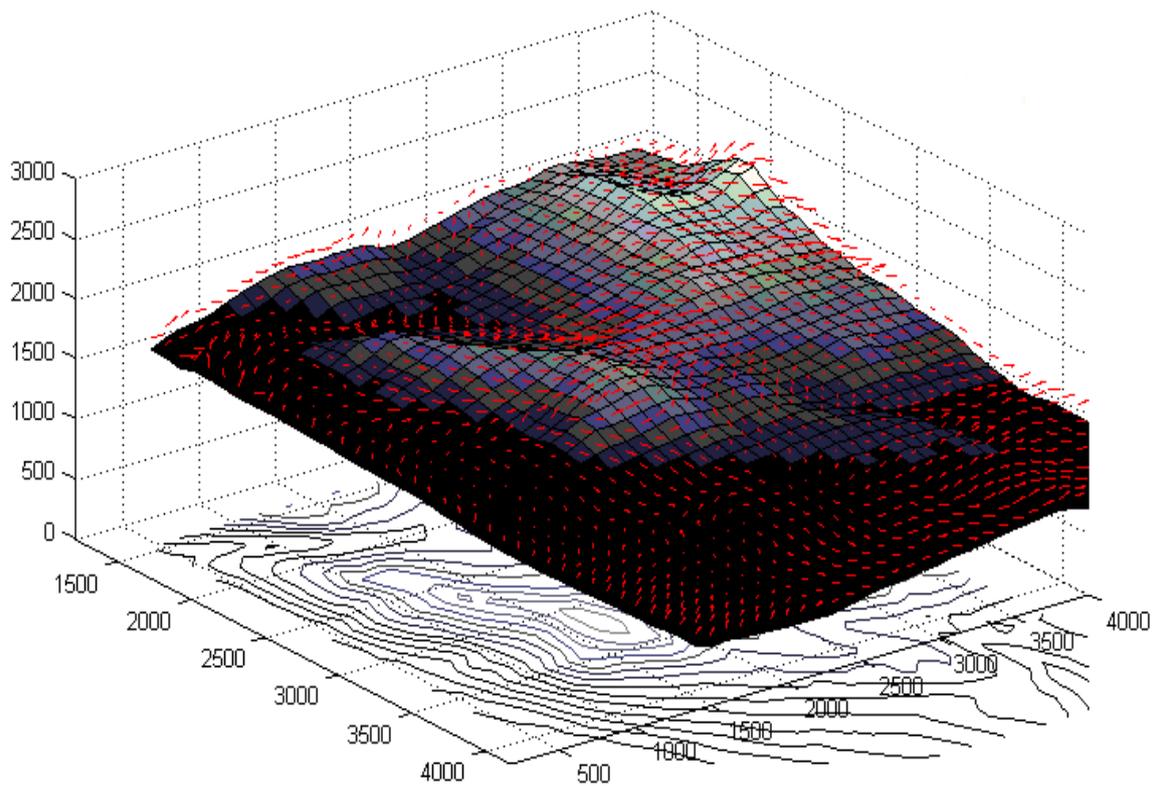


Abbildung 6: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie.

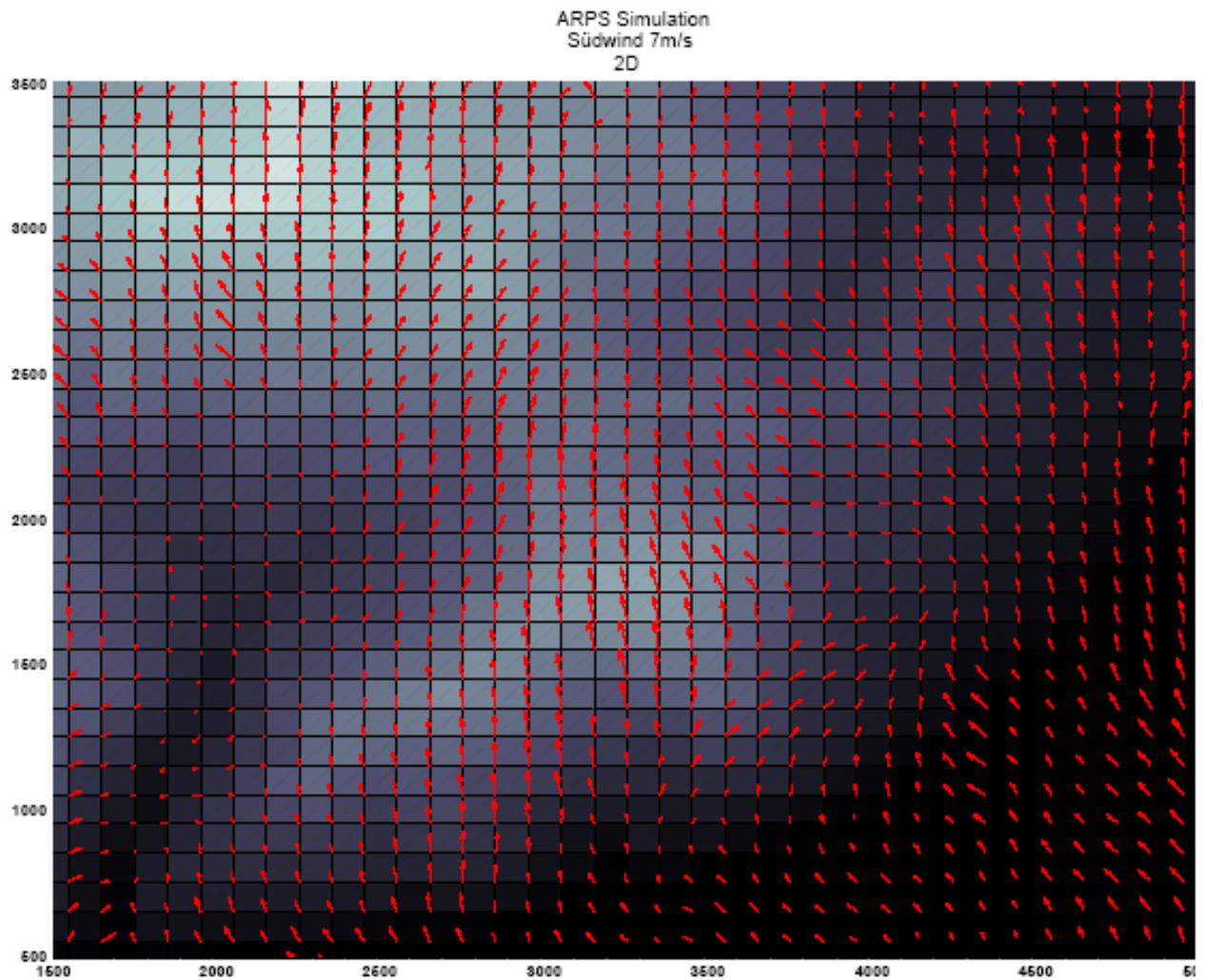


Abbildung 7: ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie



6.1.5.2 Wetterlage: West - Nordwest

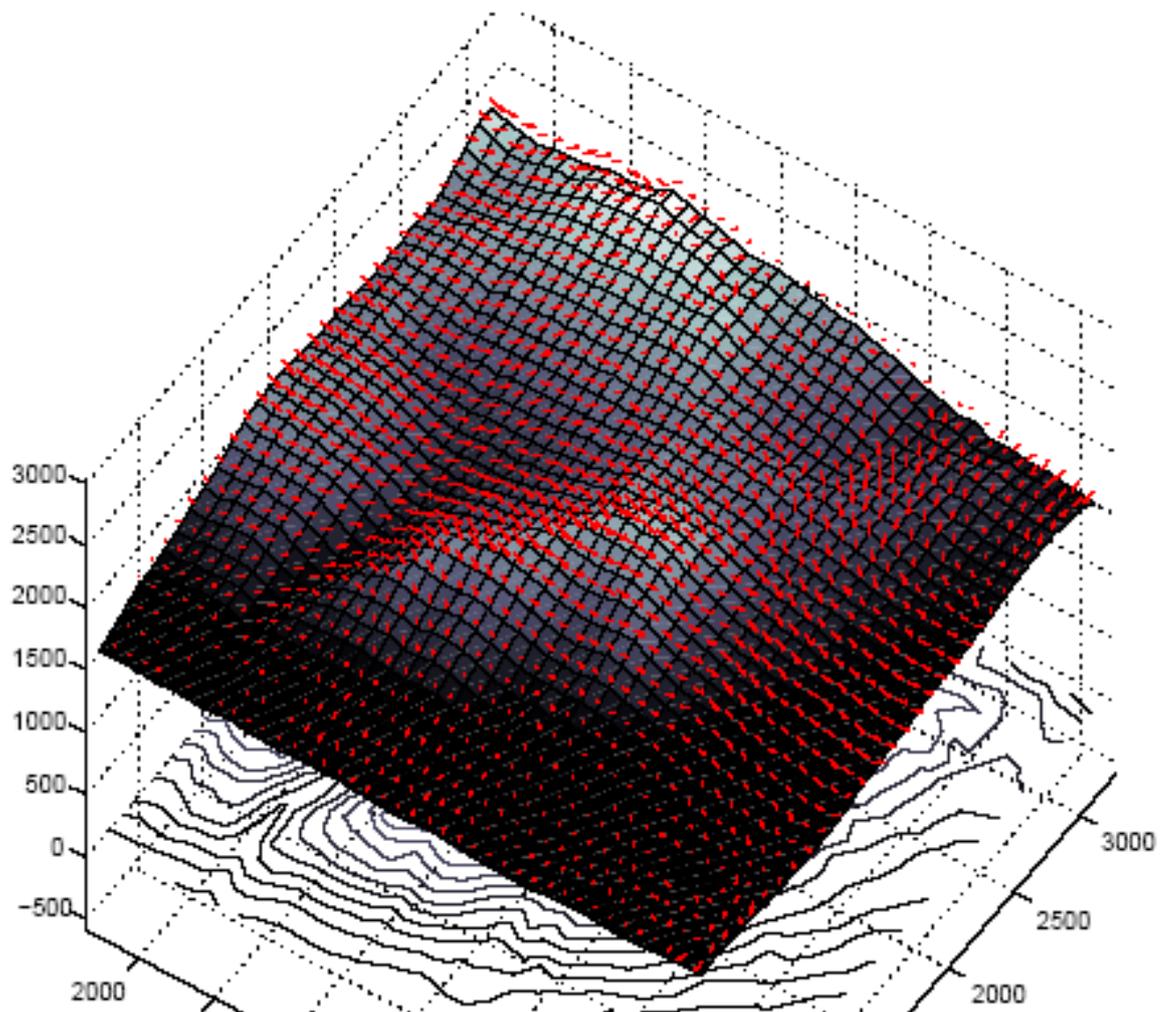


Abbildung 8: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie

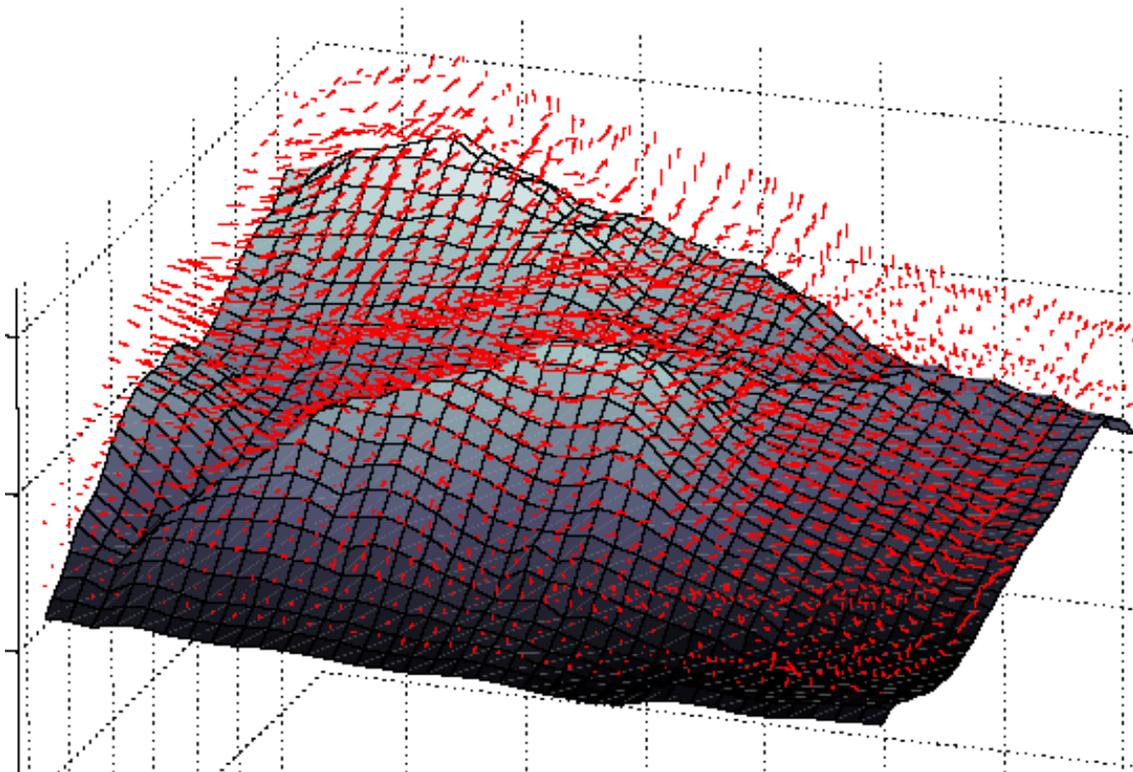


Abbildung 9: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste und dritte Rechenschicht über der Topographie

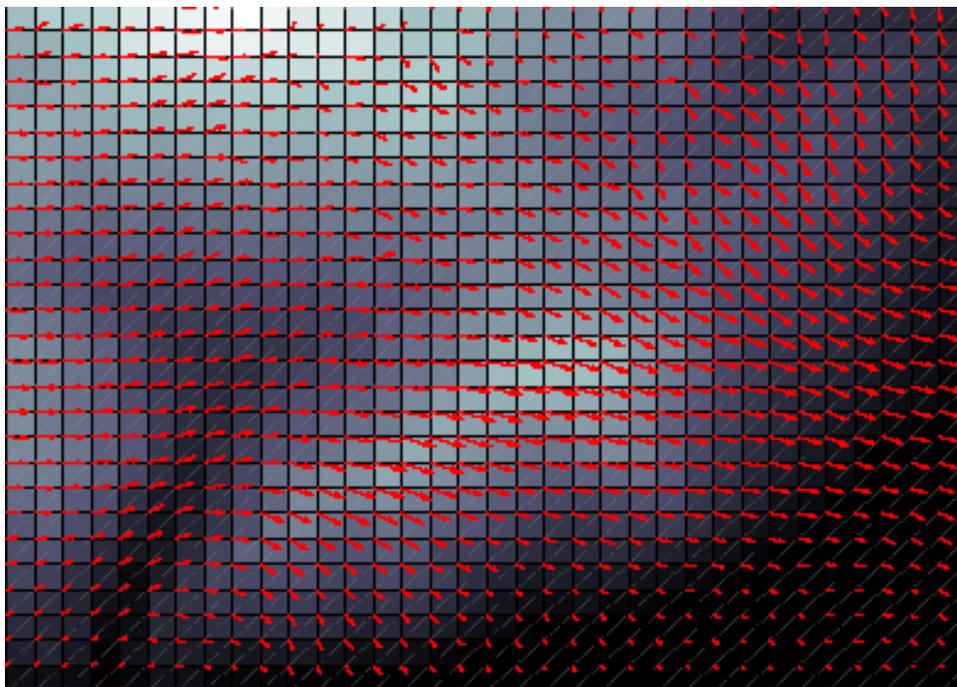


Abbildung 10: ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie



6.2 Vergleich der Wind Strömungsmodelle

Da Modelle immer ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellen und die Qualität einzelner Modell stark von einzelnen Parametern und Randbedingungen abhängt, ist es gerade bei Windströmungsmodellen unerlässlich verschiedene Modelle miteinander zu vergleichen und diese - wenn möglich - Messungen der realen Windverhältnisse gegenüberzustellen. Im folgenden wird ein Ergebnis der Simulation mit „ARPS“ der Simulation mit „Femlab (Comsol)“ verglichen. Obwohl sowohl die physikalischen als auch die mathematischen Vorgangsweisen der besprochenen Modelle unterschiedlich sind, können beide Modelle den zu erwarteten Strömungsverlauf darstellen.

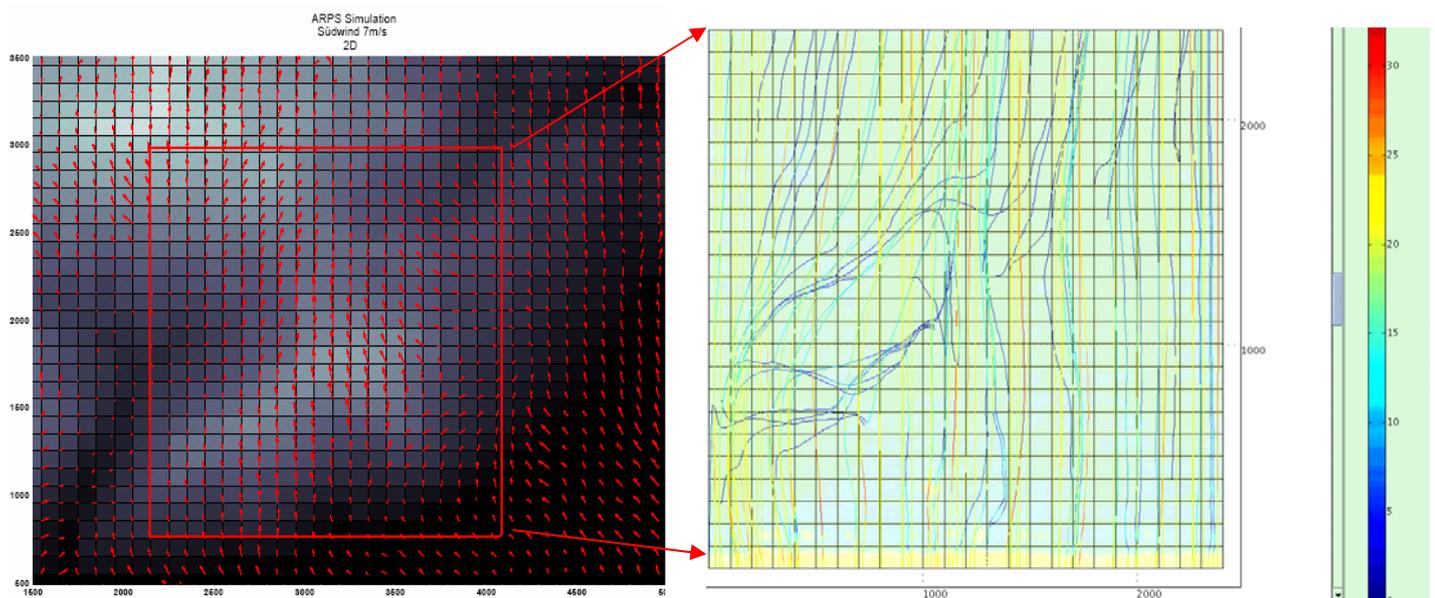


Abbildung 11: Vergleich der ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn), Erste Rechenschicht über der Topographie; mit dem Ergebnis der „Femlab“ (Comsol) Simulation mit gleichen Eingangsbedingungen, Darstellung der Strömungslinien (siehe dazu Zwischenbericht Rep. 106, 2005)



Grundsätzlich kann also die Windströmungssituation bezogen auf einzelne Beispielfälle berechnet werden. Eine genaue Evaluierung der Ergebnisse anhand der Punktmessungen der Windmessstationen ist mit Ungenauigkeiten behaftet. Da der Wind natürlich kein stationärerer Zustand ist und sich andauernd ändert sind die Ergebnisse der Windströmungssimulation in diesem Sinne zu beurteilen. Ein wichtiger Schritt wird in Zukunft sein, einerseits durch bessere Windmessmethoden und andererseits durch die Verbindung und Gegenüberstellung der Ergebnisse der Windströmungssimulation mit den Ergebnissen der flächigen Schneehöhenverteilung die Relevanz der einzelnen Methoden zu überprüfen.



7 HANGBEZOGENE ERMITTLUNG DER FLÄCHIGEN SCHNEEHÖHENVERTEILUNG

Um die Menge an Schnee, die aufgrund von Schneeverfrachtung durch den Wind umgelagert wurde, zu quantifizieren, ist die Kenntnis der flächigen Schneehöhenverteilung in potentiellen Lawinenanbruchgebieten von großer Bedeutung. Allerdings scheitert die genaue Bestimmung der Schneehöhen etwa mittels Sondierung zumeist an der Unzugänglichkeit des Geländes oder der bestehenden Lawinengefahr. Deshalb wurde im Zuge dieses Projektes die Möglichkeit untersucht, die Schneedecke mit terrestrischen Laserscannern über Entfernungsmessung zu analysieren.

7.1 Zielsetzung für den zweiten Messwinter

Da sich bei Testmessungen im Winter 2004/05 mit dem Laserscanner Riegl LPM-i800HA die flächige Messung der Schneehöhenverteilung als viel versprechende Methode erwiesen hat, sollte anhand einer aufwendigen Messreihe im folgenden Winter die genauen Möglichkeiten für dessen Anwendung im operativen Gebrauch der WLW festgestellt werden. Hierfür wurde ein Vergleich zweier unterschiedlicher Laserscanner angestrebt, um analytisch die Messergebnisse zu evaluieren und im Detail die Vorgangsweise bei der Messung zu bestimmen. Der Laserscanner Riegl LPM-2k sollte in erster Linie aufgrund seiner Reichweite von bis zu 2500m für diese Messreihen zusätzlich zum Laserscanner Riegl LPM-i800HA verwendet werden. Folgende entscheidende Kriterien für brauchbare Messergebnisse sollten anhand dieser Messreihen zur Verwendung eines Laserscanners zur flächigen Schneehöhenmessung durchleuchtet werden:

- Benötigte Infrastruktur
- Meteorologische Bedingungen
- Zustand der Schneedecke
- Möglichkeiten des Datenmanagements



7.2 Messdesign

Da zusätzlich nun mit dem Laserscanner LPM-2K Messungen stattfinden sollten, wurden zwei Versuchsgebiete ausgewählt, um die Reichweite des LPM-2K auszunützen. Eine Versuchsfläche ist am Kriegerhorn (auf ca. 1900müM), östlich exponiert und in 1000 bis 1500 m Entfernung zum Scanner gelegen. Sie ist eine für Lawinenanbruchgebiete und Schneeablagerungsflächen repräsentative Messfläche, in der sich auch Stützverbauungen befinden. Eine zweite Versuchsfläche ist in etwa 1200 bis 1800m Entfernung zum Scanner gelegen und kann von der selben Scannerposition aus eingesehen werden. Diese Versuchsfläche soll die Reichweite des LPM-2k ausloten und die Sinnhaftigkeit von Messungen über diese lange Distanz erläutern. Für eine einfache Überprüfung der Messergebnisse wurde noch eine kleine dritte Versuchsfläche nahe der Scannerposition in etwa 50m Entfernung ausgewählt. (siehe Abbildung 2, Seite 11)

7.3 Die Laserscanner

Zur Verwendung kamen der Laserscanner Riegl LPM-i800-HA sowie der Laserscanner LPM-2K mit folgenden technischen Daten:

Riegl LPM-i800HA:



Reichweite: bei gut reflektierenden Zielen, ($p > 80\%$), 800m

Messgenauigkeit: bis zu 15mm

Auflösung: bis 1mm

Beam divergence: 1,3mRad

Laserwellenlänge: 0,9 μm (nahe infrarot)

Scannbereich: horizontal: 360°

vertikal: -20°/+130°

Gewicht: etwa 15 kg

Dimensionen (LxBxH): 287 x 300 x 320 mm

Abbildung 12: Der Laserscanner Riegl LPM-i800-HA im Einsatz



Riegl LPM-2K:



Reichweite: bei gut reflektierenden Zielen, ($\rho > 80\%$),
2500m

Messgenauigkeit: bis zu ± 50 mm

Auflösung: bis 10mm

Beam divergence: 1,2mRad

Laserwellenlänge: 0,9 μ m (nahe infrarot)

Scannbereich: horizontal: 360°

vertikal: -60°/+130°

Gewicht: etwa 15 kg

Dimensionen (LxBxH): 287 x 300 x 320 mm

Abbildung 13: Der Laserscanner Riegl LPM-2K

Funktionsweise: Der Scanner errechnet die Distanz zur Oberfläche, indem er die gemittelte Laufzeit kurzer Laserimpulse bestimmt. Diese Laserimpulse werden in Winkelabständen ausgesendet. Objekte die näher zum Scannerstandpunkt gelegen sind erreichen daher eine größere Auflösung im Messergebnis als Objekte die weiter entfernt sind. Weiters ergibt sich, dass der Laserkegel des Laserimpulses mit der Entfernung stetig zunimmt; die Größe des Laserkegels gibt der beam divergence Wert in mRad. an. Dieser ist bei beiden Scannern ähnlich (LPM-i800-HA: 1,3mRad; LPM-2K: 1,2mRad). Ein Wert von 1,2mRad bedeutet, dass der Laserkegel in 100m Entfernung ein Größe von 12cm aufweist. In 1000m erreicht der Laserkegel bereits eine Größe von 1,2m. Also ist bei Messungen mit großer Entfernung zu bedenken (etwa bei Messungen über 2000m wäre der Laserkegel bereits 2,4m groß), dass durch die Mittelung der Laufzeit über diesen großen flächigen Bereich Ungenauigkeiten vor allem bei sehr inhomogenen Oberflächen entstehen. Verglichen mit konventionellen Methoden der Vermessung ergeben sich durch diese flächige Form der Vermessung folgende Vor- bzw. Nachteile:



Tachymetrie / Photogrammetrie	Terrestrisches Laserscanning
1. Einzelpunktmessung 2. Kante wird aus Punkten abgeleitet (approximiert bzw. interpoliert) 3. Fläche wird aus „wenigen“ Einzelpunkten abgeleitet	1. Bestimmung der Flächen (aus sehr vielen Einzelpunkten) 2. Kante aus Flächenverschnitt abgeleitet 3. Einzelpunkt aus Kanten- bzw. Flächenverschnitt abgeleitet

7.4 Messung:

Folgende Punkte sind beim Einsatz des Laserscanners zur Bestimmung von Schneehöhen im alpinen Gelände zu berücksichtigen:

7.4.1 Atmosphärische Korrektion

Laser-Distanz-Messungen basieren auf einer Zeitmessung der Flugzeit des Laserimpulses. Deswegen muss man die Geschwindigkeit des Lasersignals mit hoher Genauigkeit kennen. Aber die Geschwindigkeit des Lichts ändert sich mit Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit.

- Eine Änderung der Temperatur von 1°C, bedeutet einen Änderung der Korrektion von +1 ppm
- Eine Änderung des Luftdrucks von 10 mbar, bedeutet eine Änderung der Korrektion von -2,7 ppm
- Eine Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit von 0 – 100%, bedeutet eine Änderung der Korrektion von nur 0,5 ppm

Eine Änderung von 5 ppm in der Korrektion, bedeutet bei einem 100 m entfernten Zielobjekt eine Ungenauigkeit in der Distanzmessung von 5 mm. (Luftfeuchte kann vernachlässigt werden).

7.4.2 Wetter:

Bei Niederschlag in Form von Regen oder Schnee sowie bei schlechter Sicht durch Nebel können keine Messungen durchgeführt werden.

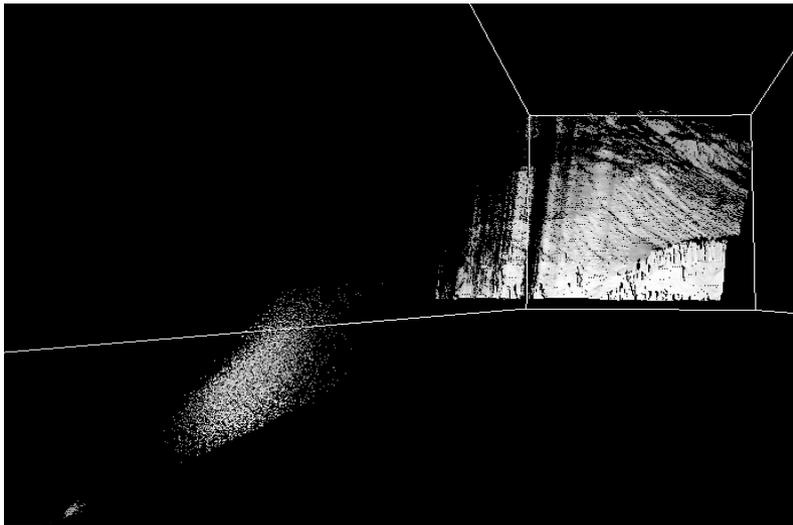


Abbildung 14: Durch einsetzenden Schneefall beeinflusste Messung

Die kurzwellige Strahlung spielt ebenfalls eine Rolle bezüglich des Messergebnisses. Jedenfalls ist eine Abnahme der Intensität des von der Schneeoberfläche reflektierten Laserstrahls festzustellen, was noch keinen Fehler in der Entfernungsmessung ergibt, allerdings einen Verlust an Reichweite bedeutet (Siehe Abbildung 15). Trotzdem kann man aufgrund von Unregelmäßigkeiten bei einigen Messergebnissen zum jetzigen Zeitpunkt einen Einfluss der kurzwelligen Strahlung auf die Entfernungsmessung nicht ganz ausschließen.

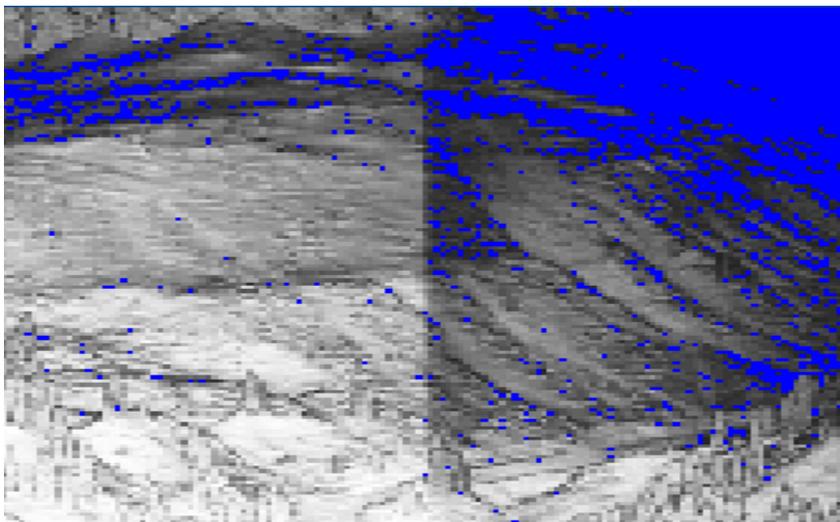


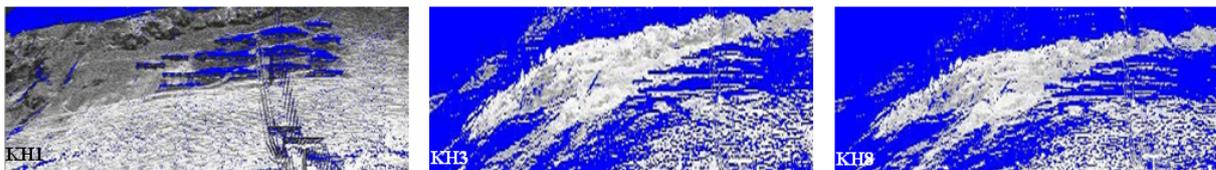
Abbildung 15: Intensitätswerte beeinflusst durch die kurzwellige Strahlung

7.4.3 Zustand der Schneedecke

Da im ersten Versuchswinter erste Erkenntnisse gewonnen wurden, dass bei warmen Luft- (über $\sim +5^{\circ}\text{C}$) und Schneedeckentemperaturen (im 0°C Bereich) der



Laserstrahl nicht mehr reflektiert werden konnte, wurde im zweiten Messwinter eine genaue Analyse angestrebt, in der geklärt werden sollte, unter welchem Zustand der Schneedecke Messausfälle zu erwarten sind. Hierfür wurden an verschiedenen Tagen, bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen sowie verschiedenem Zustand der Schneedecke Scans der Schneedeckenoberfläche in den Versuchsgebieten erstellt. Gleichzeitig wurde die Schneedecke selbst intensiv auf die folgenden in der Schneeforschung üblichen Parameter untersucht: Schneedeckentemperatur, Korngröße; Kornform, Feuchtigkeit (Handprobe), Schneedichte. Zusätzlich wurden meteorologische Parameter der im Versuchsgelände gelegenen Messstation in die Analyse mit einbezogen. Diese sind: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und kurzwellige Strahlung. Anhand dieser Parameter konnte evaluiert werden, dass die Schneefeuchte die Möglichkeit der Schneedeckenoberfläche das Lasersignal zu reflektieren beeinflusst. Der Vergleich verschiedener Scans zeigt eine Reduktion (in%) an reflektierten Laserimpulsen bei einer Zunahme an Feuchtigkeit in der Schneedecke.



scan	date	area	air temp.	humidity	air pressure	sstemp.	swrad	cform(surf)	csize(surf)	wetness	snow density	% data
KH1	14.03.2005 09:51am	1	-1,8	40%	890	-5	600	3-2	0,3-0,5	1-1	230	85,24
KH3	21.03.2005 12:25pm	1	8	50%	920	0	840	6-6	0,5-1,5	3-3	430	45,86
KH8	24.03.2005 01:58pm	1	12	50%	935	0	750	6-6	0,6-1,8	3-4	480	39,66

Abbildung 16: Vergleich des reflektierten Signals (%) unterschiedlicher Scans

Bei warmen Lufttemperaturen, starker Sonneneinstrahlung, einfach wenn Feuchtigkeit in der Schneedeckenoberfläche besteht, ist die Möglichkeit dieser das Lasersignal zu reflektieren stark herab gesetzt. Dies war grundsätzlich zu erwarten, da der Laserstrahl von Wasserflächen nicht reflektiert werden kann, weil er im Wasser gebrochen wird. Je größer nun der Gehalt an Wasser in der Schneedeckenoberfläche ist, desto weniger Lasersignale werden von der Schneedeckenoberfläche reflektiert.

Aus dieser Analyse und viel in der Messpraxis gewonnener Erfahrung kann bezüglich des Reflexionsverhaltens von Oberflächen folgende Erkenntnis gewonnen werden:



Die Intensität des reflektierten Lasersignals hängt in erster Linie vom Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Zielobjekt ab, und erst in zweiter Linie von der Distanz des Zielobjektes zum Laserscanner.

7.4.4 Standort:

- Der Scanner sollte möglichst frontal zum Aufnahmegebiet stehen um schleifende Schnitte des Lasers am Zielobjekt zu verhindern.
- Jedes Objekt zwischen Scanner und Zielobjekt erzeugt einen Messschatten, der nur durch zusätzliche Scannerpositionen vermieden wird.
- Jede Position des Scanners muss eingemessen werden, um unterschiedliche Scans vergleichen zu können. Dies wird mit Hilfe von Reflektoren (montiert an Fixpunkten mit Sicht zum Scanner) vorgenommen.
- Diese Reflektoren müssen mittels einer Totalstation oder einem differenziellen GPS eingemessen werden, um die Daten des Laserscanners ins globale Koordinatensystem zu transferieren.

Weiters zu berücksichtigen ist natürlich die Reichweite des Scanners. Diese ist, wie bereits erwähnt, bei den verwendeten Geräten unterschiedlich und stellt im Einsatz bei lawinengefährdeten Hängen einen limitierenden Faktor dar. Je nach Aufgabenstellung und gewünschter Genauigkeit muss der geeignete Laserscanner gewählt werden. Da der Scanner „Wind und Wetter“ nicht ausgesetzt werden darf, muss, wenn ein Standort dauerhaft genutzt wird, für eine geeignete Unterbringung des Lasers gesorgt werden. Der Laser arbeitet nur bei einer Gerätetemperatur von 0°C bis + 50°C, daher muss er in einem Raum stehen, der über 0°C erwärmt ist oder muss zwischen den einzelnen Aufnahmen „aufgewärmt“ werden, also in beheizte Räume zur Lagerung untergebracht werden.



7.4.5 Koordinatensysteme

Die Verarbeitung der von den Laserscannern generierten Daten basiert in drei verschiedenen Koordinatensystemen:

- Der erste binäre Datenstrom des 3D-Laserscanners wird in das scannereigene Koordinatensystem übermittelt (SOCS)
- Um verschiedene Scans zu vergleichen, nachdem man die Reflektoren eingemessen hat, können die Daten ins Projekt – Koordinatensystem übertragen werden (PRCS)
- Mittels der globalen Koordinaten der Fixpunkte können die Daten ins globale Koordinatensystem übertragen werden (GLCS)

7.4.6 Evaluierung der Messungen:

Im Zuge dieses Projektes wurde analysiert, ob der Laser in die Schneedecke eindringt oder wie gewünscht gleich von der Oberfläche reflektiert wird. Hierfür wurden Reflektoren an der Oberfläche der Schneedecke angebracht, die nahezu 100%ig reflektieren. Die Distanzwerte der Reflektoren wurden dann mit den Werten der Schneeoberfläche verglichen.

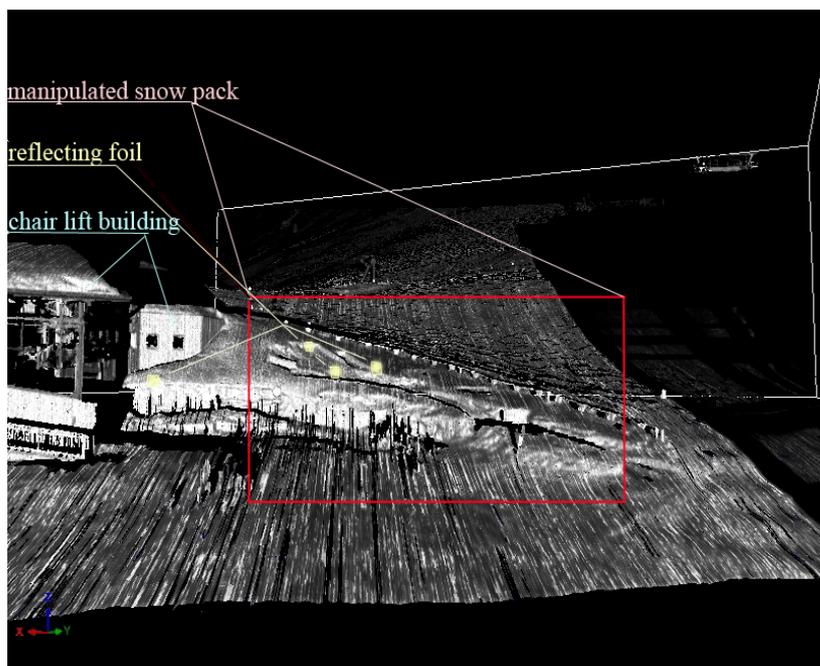


Abbildung 17: Evaluierung der Messergebnisse



Diese Analyse konnte an mehreren Messtagen durchgeführt werden, wobei keine signifikante Eindringung des Lasers in die Schneedecke festgestellt werden konnte.

Eine schnelle Überprüfung der Stimmigkeit der Messergebnisse erlauben fixe Objekte, die im gescannten Bereich liegen. Die Distanzmessung zu diesen Objekten muss immer den gleichen Wert ergeben. Legt man zwei unterschiedlich Messergebnisse im Postprocessing übereinander, darf keine Abweichung im Ergebnis der Darstellung dieser fixen Objekte feststellbar sein.

Eine weitere Möglichkeit der Evaluierung der Messergebnisse stellt der Vergleich mit konventionellen Messmethoden wie Schneehöhenablotung und photogrammetrischen Auswertungen dar. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass der Vergleich von Punktmessungen (Schneehöhenablotung) mit der flächigen Lasermessung Ungenauigkeiten erzeugt. Im Folgenden ist ein Vergleich dargestellt bei dem Distanzen in etwa 114 m Entfernung vom Scannerstandpunkt analysiert wurden. An der Wand einer Liftstation hat sich eine Schneewechte ausgebildet, die Kante dieser Schneewechte kann, da die Maße der Wand abgemessen wurden und daher bekannt sind, sowohl in den photogrammetrischen Analysen als auch im Laserscann bestimmt werden. Geht man von einer vom Hersteller angegebenen Ungenauigkeit der Laserscannmessung beim Riegli i800HA von $\pm 15\text{mm}$ aus und bedenkt man, dass auch bei normalen Ausmessungen mittels eines Maßbandes Ungenauigkeiten entstehen, bewegen sich die Abweichungen der Ergebnisse der unterschiedlichen Messungen in dem vom Hersteller angegebenen Bereich von $\pm 15\text{mm}$. Zu bemerken ist allerdings, dass dieser Fehler in höherer Entfernung des Zielobjektes zum Scanner größer als in diesem Vergleich sein kann.

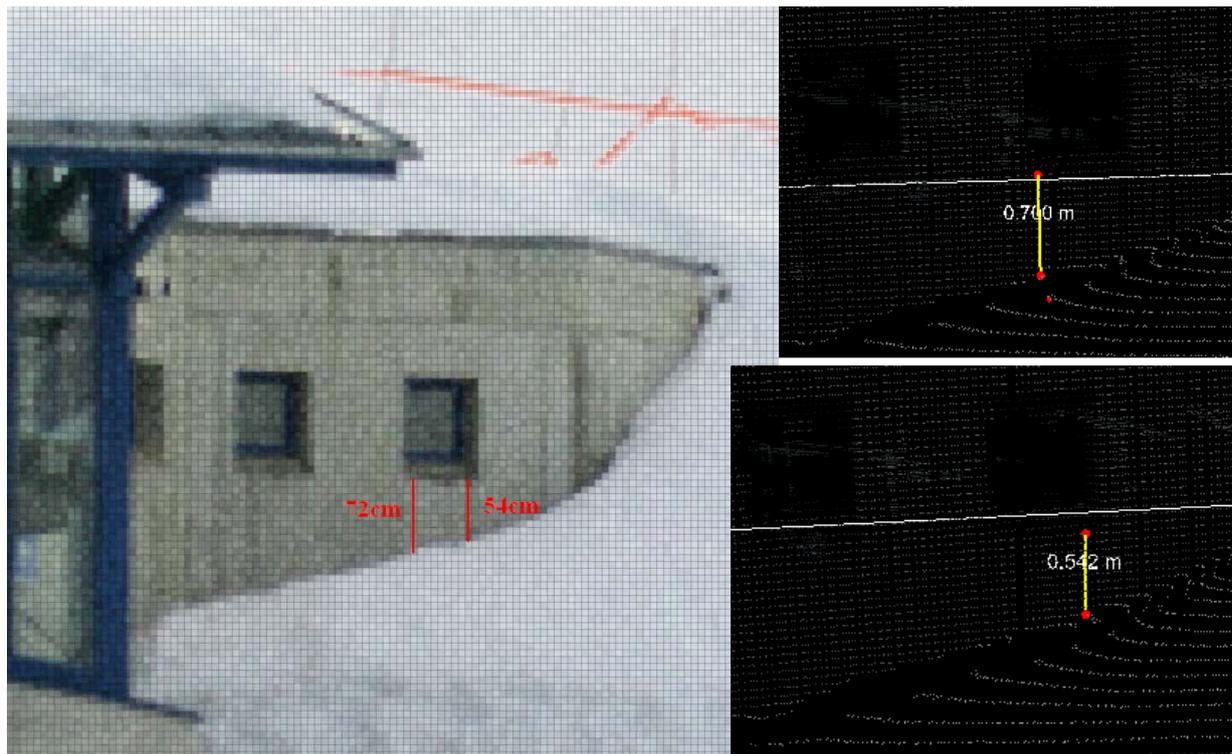


Abbildung 18: Vergleich der Distanzwerte zwischen der Analyse von Photos bzw. Punktwolken der Laserscans.

Aus unterschiedlichen Gründen kann es, wie weiter oben bereits erwähnt, zu Messausfällen kommen. Diese sind allerdings einfach am Fehlen von Werten in der vom Laserscanner generierten Punktwolke zu erkennen, und somit leicht interpretierbar.

7.4.7 Messablauf

Im ersten Messwinter wurde der Laserscanner Riegli i800HA für Testmessungen benutzt (siehe dazu auch Zwischenbericht Rep. 106, November 2005). Im zweiten Messwinter (2005/2006) wurde nun eine ganze Messserie über die Winterperiode durchgeführt, allerdings mit dem Laserscanner Riegli LPM-2k. Da noch keine Erfahrungen über die Messpraxis dieses Scanners vorlagen, mussten die Vor- und Nachteile dieses Scanners erst erkannt werden. Der erste auf der Hand liegende Vorteil des Riegli LPM-2k liegt in seiner größeren Reichweite. Um diese auszunutzen wurde demnach Versuchsgebiete in 1000-1500 m sowie in 1200-1800 m Entfernung zum Scannerstandpunkt gewählt.

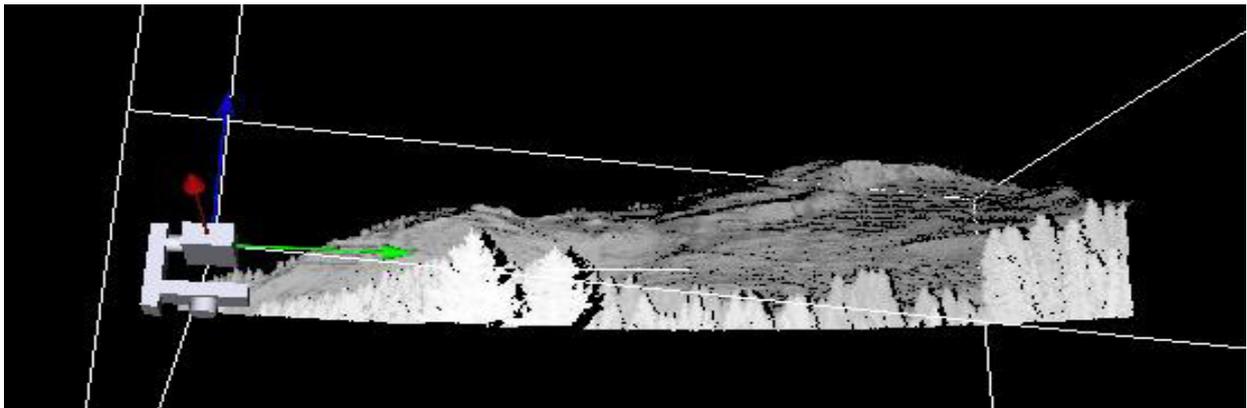


Abbildung 19: Scann des in 1000 – 1500 m zum Laserscannerstandpunkt entfernt gelegenen Versuchsgebietes

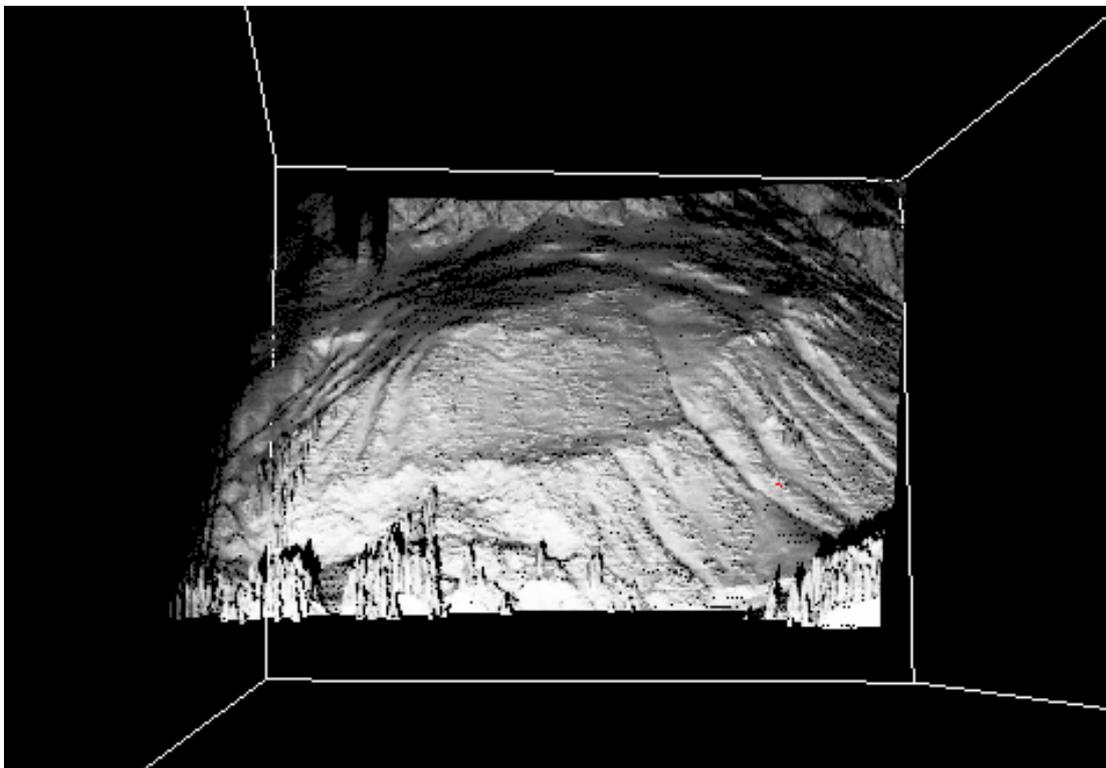


Abbildung 20: Scann des in 1200 – 1800 m zum Laserscannerstandpunkt entfernt gelegenen Versuchsgebietes

Mit der Erhöhung der Reichweite ist allerdings ein Verlust an Genauigkeit verbunden. Das ergibt sich einerseits durch die Laserstrahldivergenz, also die Größe des Laserkegels, der in 1000 m Entfernung 1,2 m Durchmesser, in 2000 m allerdings bereits einen Durchmesser von 2,4 m aufweist. Da die Laufzeit über diese Fläche des Laserkegels gemittelt wird, ergeben sich vor allem bei sehr inhomogenen Flächen Ungenauigkeiten. Andererseits vergrößert sich ein sehr kleiner Fehler beim



Einmessen der Reflektoren des Scannerstandpunktes in zunehmender Entfernung entsprechend. Auch birgt die Messung von einem Stativ aus die Gefahr, dass bei stürmischem Wetter oder nicht ganz fixierter Aufstellung des Stativs Vibrationen am Laserscanner entstehen die sich natürlich in größerer Entfernung des Zielobjektes deutlicher im Messergebnis niederschlagen. Für eine einfache Überprüfung der Messergebnisse wurde noch eine kleine dritte Versuchsfläche nahe der Scannerposition in etwa 50m Entfernung ausgewählt. Zusätzlich wurden in einem zugänglichen Hang Schneehöhenablotungen durchgeführt, um Referenzwerte für die Bestimmung der Schneehöhen mittels der Laserscanner zu erhalten.

Die Messungen begannen im Dezember 2005 und wurden über den restlichen Winter bis April 2006 in unterschiedlichen Abständen durchgeführt.

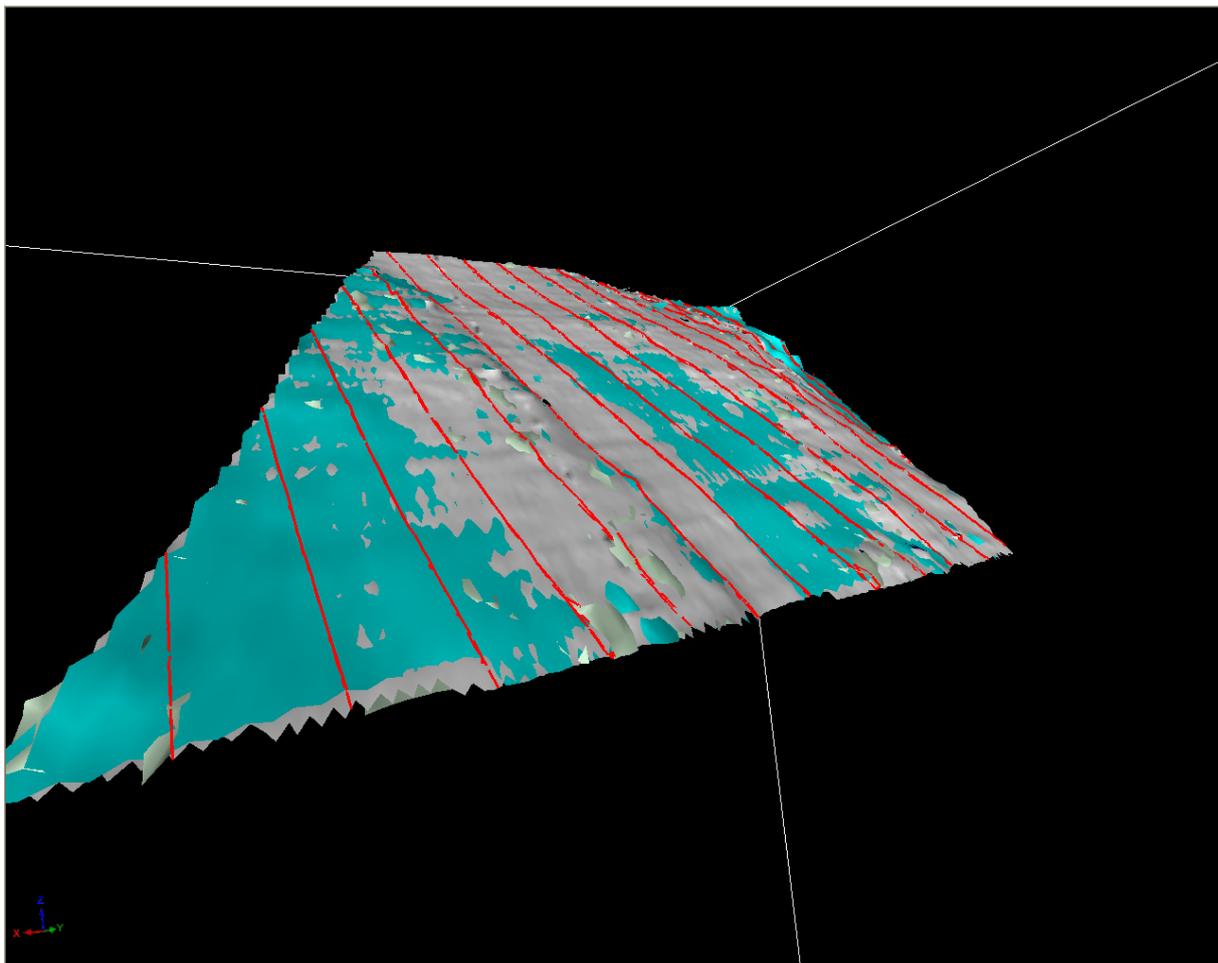


Abbildung 21: Aus den Punktwolken generierte triangulierte Oberflächen verschiedener Scans der Schneeoberflächen bzw. des Geländes. (rot eingefärbt: Schnitte zur weiteren Darstellung der Schneehöhenunterschiede)



7.5 Datenverarbeitung:

Bei der weiteren Verarbeitung der vom Laserscanner generierten Punktwolken wurde auf einfache und schnelle Methoden Wert gelegt. Durch die Verbesserung der Riegl-Software RiPROFILE können folgende Schritte bereits in der scannereigenen Software durchgeführt werden.

- Octree-Filter
- Triangulieren
- Schnitte
- Volumenberechnungen
- Coloure from Images
- Filter
- Distanzmessung

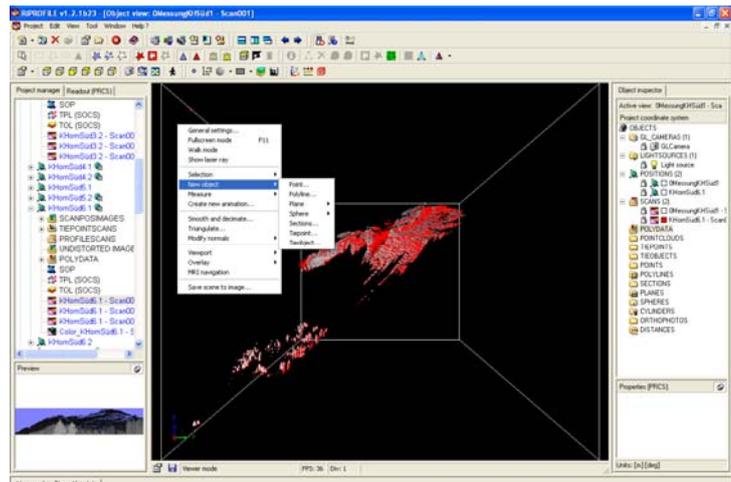


Abbildung 22: Riegl-Software RiPROFILE

Durch die unterschiedliche Auflösung der Punktwolke (gegeben durch die Vorgangsweise der horizontalen und vertikalen Winkelabstandsmessung) haben Punkte in der Punktwolke von Objekten nahe dem Scannerstandpunkt eine höhere Auflösung als von Objekten die weiter entfernt sind. Um diesen Unterschied in der Auflösung der Punktwolke zu einem einheitlichen Raster zusammenzufassen, kann der Octree-filter verwendet werden.

Um die Punktwolke zu einer Oberfläche zu generieren und um weitere Bearbeitungsschritte wie die Erstellung von Schnitten vorzunehmen, wird die Punktwolke bereits in der Riegl-Software RiPROFILE trianguliert.

Anhand von Vergleichen der triangulierten Punktwolken zweier oder mehrerer Scans werden in einem definierten Bereich Schnitte und Volumenberechnungen vorgenommen. Einfache Distanzmessungen sowie die Filterung der Daten in unterschiedlicher Form kann ebenfalls mittels der Riegl-Software RiPROFILE vorgenommen werden.

Für die Präsentation der Punktwolken und zur Evaluierung der Daten anhand von digitalen Photos ist die Funktion „Color from Images“ ein hilfreiches Tool. Durch die



Photos der kalibrierten sowie montierten digitalen Kamera des Scanners können die Farben der Photos den Punkten der Punktwolken hinterlegt werden.

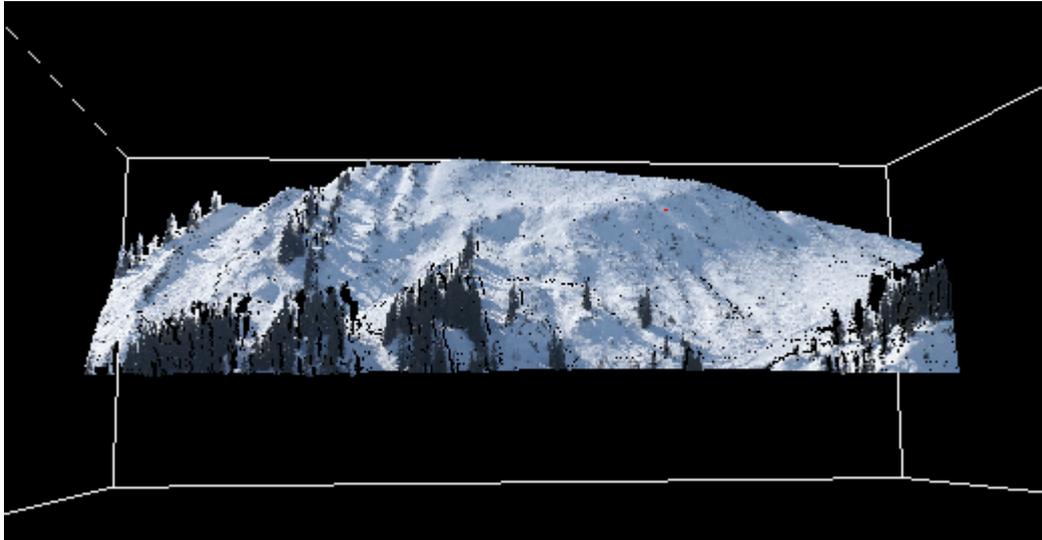


Abbildung 23: Mit Farben der digitalen Photos hinterlegte Punktwolke von einem Teil des Versuchsgebietes 2

In weiterer Folge sollen Schneehöhen an gewünschten Profilen dargestellt und zweitens das Volumen der Schneedecke in einem bestimmten Ausschnitt berechnet werden.

7.5.1 Schneehöhen:

Um die Schneehöhen zu ermitteln, wurden aus den Punktwolken des Laserscanners, der einzelnen Schneehöhenscans, Flächen trianguliert, die über einen triangulierten Scann der Geländeoberfläche ohne Schnee, gelegt werden. Die Raster der einzelnen Schneehöhen stellen somit einen Höhenunterschied zur Geländeoberfläche dar. Dieser wird durch ein Profil an jeder Stelle, die von Interesse ist, ermittelt. Diese Vorgangsweise erlaubt eine schnelle und präzise Darstellung der Schneehöhen verschiedener, im Laufe eines Winters oder einer Zeitperiode aufgenommener Daten. Unterschiede in der Schneehöhe, verursacht etwa durch Abschmelzvorgänge oder Schneeverfrachtung, können dementsprechend beurteilt werden

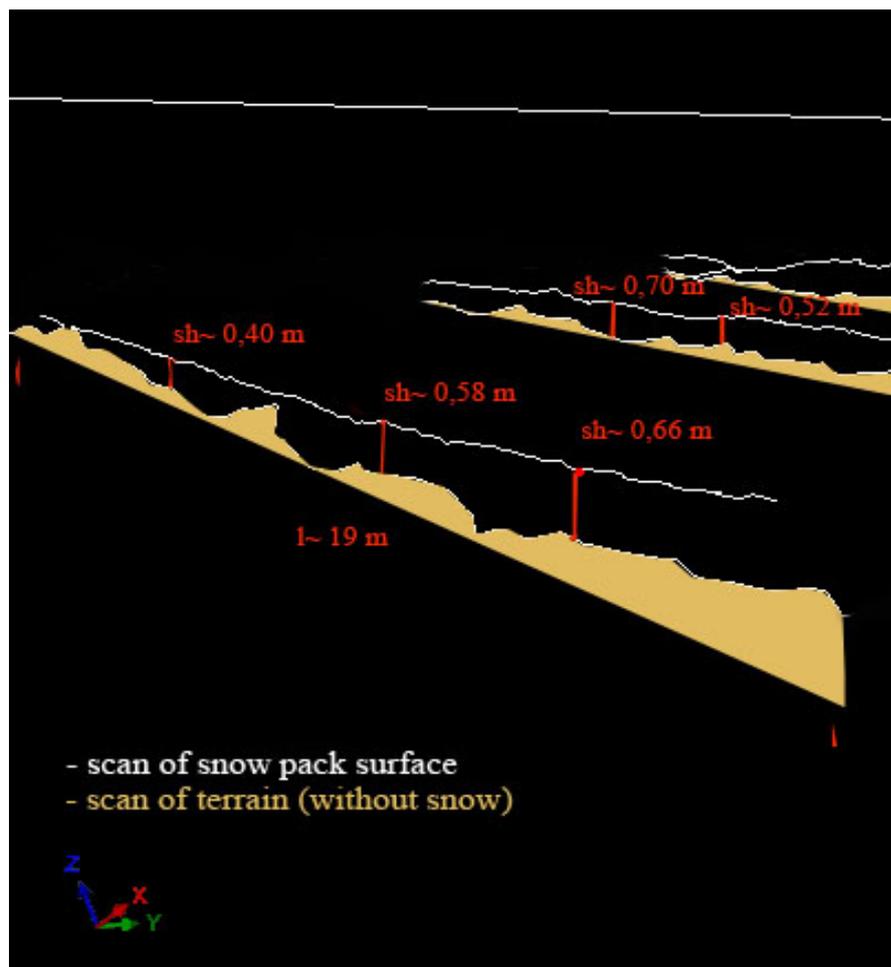


Abbildung 24: Profilerstellung einer Schneehöhen und der Geländeoberfläche

7.5.2 Schneedeckenvolumen / Schneemasse

Neben der Bestimmung der Schneehöhen ist die Ermittlung des Volumens der Schneedecke und in weiterer Folge, sofern dem Volumen eine Dichte zugeordnet wird, die Ermittlung der Schneemasse, für den Entscheidungsträger in lawinenrelevanten Thematiken von großer Bedeutung. Hierfür wurden Ausschnitte der einzelnen aus den Laserpunktewolken generierten Raster definiert, die etwa eine Lawinenanbruchfläche darstellen. Für diese Ausschnitte kann nun das Schneedeckenvolumen sowohl zwischen Geländeoberfläche und Schneeoberfläche als auch zwischen den einzelnen in zeitlichen Abständen aufgenommenen Schneeoberflächen berechnet werden. Infolgedessen kann der Aufbau und das Abschmelzen der Schneedecke quantifiziert und bezüglich unterschiedlicher Vorgänge, denen die Schneedecke im Laufe der Zeit unterzogen ist, analysiert werden. Ebenfalls ist es auf diesem Weg möglich, das Gefährdungspotential der Schneemasse, die sich in einem Lawinenanbruchgebiet befindet, einzuschätzen.

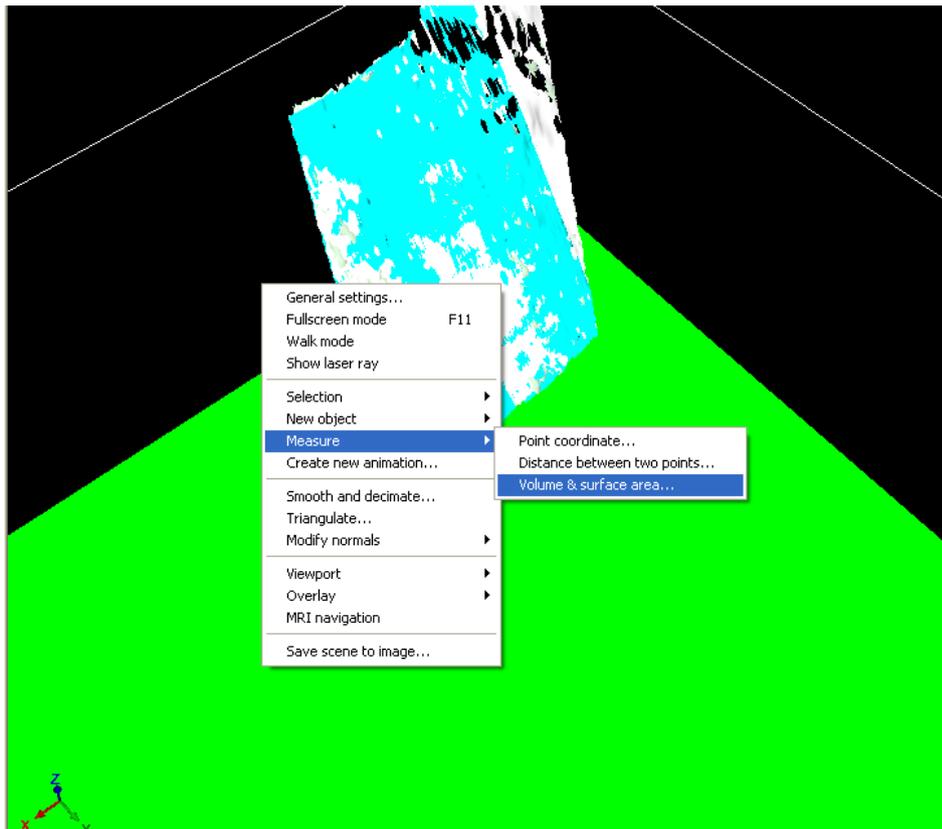


Abbildung 25: Volumenberechnung der unterschiedlichen Schneedecken

Durch den Export der Daten in andere Softwareprodukte können andere Analysemethoden gewählt werden. Den Export der Daten kann man als: ASCII, VRML 2.0, Autocad (*.dxf; *.ptc) Crystalix (*.asc) –Datei vornehmen. Jedenfalls ist bei der Weiterverarbeitung der Daten Vorsicht geboten, da die Möglichkeit besteht dann fälschliche Ergebnisse zu erzielen.

Die Daten können auch im GIS weiterverarbeitet werden. (siehe dazu Zwischenbericht Rep. 106, November 2005)



8 RESÜMEE

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung der Laserscanner zur Abschätzung der Schneehöhen sowie der Schneemasse in potentiellen Lawinenanbruchgebieten ein geeignetes Mittel darstellt und entscheidende Vorteile gegenüber traditionellen Messtechniken hat. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Bedingungen zur erfolgreichen Datenaufnahme in der Messpraxis zu berücksichtigen sind und sehr genau bei den Messvorgängen gearbeitet werden muss. Die unterschiedlichen Laserscanner haben verschieden Vor- und Nachteile, allerdings ist die höhere Reichweite des Riegl LPM-2K mit einem großen Verlust an Genauigkeit verbunden. Die Gründe dafür sind vor allem die größere Laserstrahldivergenz, die Fehler beim Einmessen der Reflektoren des Scannerstandpunktes, die sich in größerer Entfernung deutlicher auswirken, sowie die langsame Arbeitsweise des Scanners.

LPM-i800HA

- Schnell
- Beschränkte Reichweite (800 m)
- Größter Laserkegel (1,3 mRad)
- Bisher am besten geeignet!



LPM-2K

- Sehr langsam
- Sehr gute Reichweite (2500 m), allerdings Messungen über 1000 m sehr fehlerhaft
- Großer Laserkegel (1,2 mRad)





In den beiden Messwintern konnten also die Vor- und Nachteile sowohl der flächigen Schneehöhenmessung mittels verschiedener Laserscanner als auch die Modellierung der Windströmung mittels unterschiedlicher die Strömung berechnender Modelle beurteilt werden. Es kann nun über den gemessenen Hang genaue Auskunft erteilt werden, wann sich bei welchen Windverhältnissen wie viel Schnee abgelagert hat. Um generelle Aussagen über die Problematik der Schneeverfrachtung treffen zu können, muss die Stichprobe an Ereignissen allerdings deutlich erhöht werden. In Zukunft müssen weiterhin flächige Messungen der Schneehöhe zusammen mit Windmodellierungen vorgenommen werden. Außerdem müssen die Modelle zur Berechnung der Windströmung weiter verbessert und Sensitivitätsanalysen unterzogen werden.



9 LITERATURVERZEICHNIS

BIRD R.B., STEWART W.E., LIGHTFOOD E.N., 2002, Transport phenomena, Wiley, New York, second edition

CHIARI M., 2004, Analyse der technischen Schutzmaßnahmen am Beispiel der Feuersanglawine, Diplomarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien

GAUER P., 1998, Blowing and drifting snow in Alpine terrain: numerical simulation and related field measurements, *Annals of Glaciology*, Volume 26, International Glaciological Society

MELLOR M., 1965, Blowing snow, *Cold Regions and Science and Engineering Part III*, Section A3c, Hanover, New Hampshire

MONTEITH JL, UNSWORTH M., 1990, *Principals of Enviromental Physics*, 2. Auflage, Edward Arnold, London

NAAIM N., NAAIM-BOUVET F., MARTINEZ H., 1998, Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models, *Annals of Glaciology*, Volume 26, International Glaciological Society

NISHIMURA K., SUGIURA K., NEMOTO M., MAENO N., 1998, Measurements and numerical simulations of snow particle saltation, *Annals of Glaciology*, Volume 26, International Glaciological Society

POMERY J.W., 1990, Saltation of snow, *Water Resources Research*, Volume 26, Number 7, Seiten 1583 - 1594

PROKOP, A., TEUFELSBAUER, H., MAYR, P., SCHEKULIN, C. (2005): Snow drift simulation Kriegerhorn. Zwischenbericht - IAN Report 106, im Auftrag von: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Vorarlberg.

PROKOP A., 2005, Hangbezogene Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung mittels Laserscanners, Wildbach- und Lawinenverbau, 154, 80-86.

PROKOP A., 2006, Determination of the spatial snow depth distribution on slopes using terrestrial laser scanner, *Cold Regions Science and Technology*, special issue: EGU Snow & Avalanches 2006 (submitted)



PURVES R., BARTON J., MACKANESS W., SUGDEN D., 1999, The application of GIS to the modelling of snow drift, Bruce Gettings, Innovations in GIS 6, Integrating information infrastructures with GI technology



10 VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Übersichtsdarstellung des Projektgebiets (Ausschnitt aus der ÖK200, verkleinert M: 1:500.000 verkleinert)	10
Abbildung 2: Übersichtsdarstellung des Projektgebiets (Ausschnitt aus Orthofotos des Gemeindegebietes von Lech am Arlberg, Schneehöhenmessung mit dem LPM-i800HA – gelb, Schneehöhenmessung mit dem LPM-2K – orange und rot).....	11
Abbildung 3: Koordinatentransformation: orographiefolgendes Koordinatensystem	12
Abbildung 4: Anordnung der Modellvariablen auf einem geschachtelten Gitter.....	15
Abbildung 5: ARPS modell process flow.....	17
Abbildung 6: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie.....	21
.Abbildung 7 ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie	22
Abbildung 8: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie	23
Abbildung 9: ARPS Simulation. 3D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste und dritte Rechenschicht über der Topographie	24
Abbildung 10: ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 315°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn). Erste Rechenschicht über der Topographie	24
Abbildung 11: Vergleich der ARPS Simulation. 2D - Darstellung. Windrichtung 180°, Windgeschwindigkeit 7m/s (Niveau Kriegerhorn), Erste Rechenschicht über der Topographie; mit dem Ergebnis der „Femlab“ (Comsol) Simulation mit gleichen Eingangsbedingungen, Darstellung der Strömungslinien (siehe dazu Zwischenbericht Rep. 106, 2005)	25
Abbildung 12: Der Laserscanner Riegl LPM-i800-HA im Einsatz	28
Abbildung 13: Der Laserscanner Riegl LPM-2K	29
Abbildung 14: Durch einsetzenden Schneefall beeinflusste Messung	31
Abbildung 15: Intensitätswerte beeinflusst durch die kurzweilige Strahlung	31
Abbildung 16: Vergleich des reflektierten Signals (%) unterschiedlicher Scans	32
Abbildung 17: Evaluierung der Messergebnisse	34
Abbildung 18: Vergleich der Distanzwerte zwischen der Analyse von Photos bzw. Punktwolken der Laserscans	36
Abbildung 19: Scann des in 1000 – 1500 m zum Laserscannerstandpunkt entfernt gelegenen Versuchsgebietes.....	37
Abbildung 20: Scann des in 1200 – 1800 m zum Laserscannerstandpunkt entfernt gelegenen Versuchsgebietes	37



Abbildung 21: Aus den Punktwolken generierte triangulierte Oberflächen verschiedener Scans der Schneeoberflächen bzw. des Geländes. (rot eingefärbt: Schnitte zur weiteren Darstellung der Schneehöhenunterschiede).....38

Abbildung 22: Riegl-Software RiPROFILE39

Abbildung 23: Mit Farben der digitalen Photos hinterlegte Punktwolke von einem Teil des Versuchsgebietes 2.....40

Abbildung 24: Profilerstellung einer Schneehöhen und der Geländeoberfläche41

Abbildung 25: Volumenberechnung der unterschiedlichen Schneedecken42

