

Die flächige Schneehöhenmessung mittels terrestrischer Laserscanner als Grundlage für Schneedeckenmodellierungen



DI Alexander Prokop
alexander.prokop@boku.ac.at



Dipl.-Ing. Harald Teufelsbacher
harald.teufelsbacher@boku.ac.at

Universität für Bodenkultur
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter Jordan-Straße 82
1190 Wien

Tel.: +43-1-47654-4357; Fax: +43-1-47654-4390 (Stangl), Tel.: +43-1-47654-4358; Fax: +43-1-47654-4390 (Teufelsbacher)

Terrestrisches Laserscannen ist eine hilfreiche Methode in der Naturgefahrenbeurteilung um dreidimensionale Daten von veränderlichen Geländeoberflächen zu erhalten. Für die Messung der flächigen Schneehöhenverteilung kommt das „Laser profile measuring system Riegl LPM-i800HA“ zum Einsatz. Der Laserscanner errechnet die Distanz zur Oberfläche, indem er die gemittelte Laufzeit kurzer Laserimpulse bestimmt. Die durch die Lasermessung gesammelten Daten dienen als Inputparameter für ein Schneedeckenmodell, welches die Schneedeckentemperatur sowie die Dichte an einem zweidimensionalen Schnitt, der frei wählbar ist, simuliert.

1 Einleitung

Ein grundsätzliches Problem in der Lawinenprognose besteht in der Tatsache, dass bis dato die Lawinengefahr weder ausreichend messtechnisch erfasst werden kann, noch Prozesse in der Schneedecke, die die Lawinenbildung hervorrufen, hinlänglich physikalisch modelliert werden können. Deswegen wird einerseits daran gearbeitet unterschiedlichste Messtechniken die Schneedecke betreffend zu verbessern und andererseits, auch hervorgerufen durch die stetige Erhöhung der Rechenleistung, welche komplexe Simulationen ermöglicht, physikalische Prozesse in der Schneedecke zu modellieren. Die vorliegende Forschungsarbeit zeigt, wie durch die neue Messtechnik des terrestrischen Laserscannens erstmalig die Schneedecke in hoher Auflösung flächig vermessen werden konnte, ohne den lawinengefährdeten Hang zu betreten. Bisher wurde der Fernerkundungsansatz schon zur flächigen Schneehöhenbestimmung gewählt, etwa mittels terrestrischer Photogrammetrie [1], oder mittels FMCW-Radar [2]; oder zur Bestimmung der flächigen Verteilung der Schneedecke

mittels Satellitendaten [3], und mittels luftgesteuerten Laserscannens [4]. Jedoch blieb die Bestimmung der flächigen Schneehöhenverteilung in hoher Auflösung eine noch zu erarbeitende Aufgabe und konnte durch die terrestrische Lasermessung realisiert werden [5].

Im Weiteren sind die erlangten Ergebnisse Grundlage für die zweidimensionale Simulation der Temperatur und der Setzung der Schneedecke. Die Laserscannmessung dient als Initialisierung und Evaluation der Simulation. Das Schneedeckenmodell beinhaltet neben der Temperatursimulation ein physikalisch basiertes Setzungsmodell, das mit Hilfe kontinuumsmechanischer Zusammenhänge das Kriechen und Setzen der Schneedecke beschreibt. Gekoppelt mit der Massenerhaltungsgleichung kann die zeitliche Entwicklung der Dichte berechnet werden, welche wiederum einen starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Schnees hat. Die verwendeten partiellen Differentialgleichungen werden mit Hilfe der Finiten Elemente Methode gelöst. Um das Modell vollständig identifizieren zu können ist die Kenntnis genauer Schneehöhenverteilungen von großer Wichtigkeit.

2 Hangbezogene Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung mittels terrestrischen Laserscannens

2.1 Der Laserscanner

Zur Verwendung kommt der Laserscanner Riegl LPM-i800-HA, er errechnet die Distanz zur Oberfläche, indem er die gemittelte Laufzeit kurzer Laserimpulse bestimmt, der Scanner ist somit ein „Time of flight“ messender Scanner und hat folgenden technischen Daten:

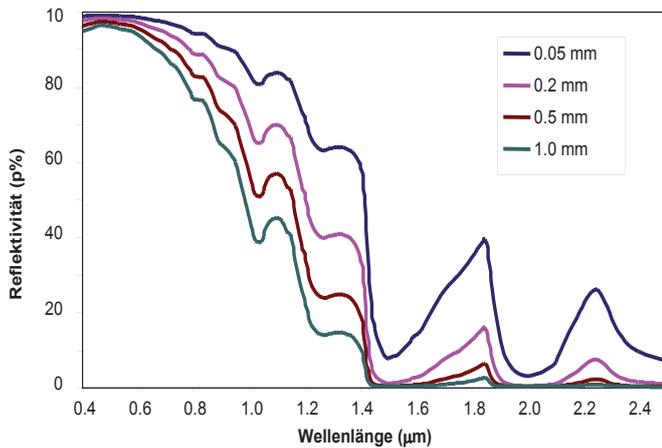


Bild 1: Spektrale Reflektivität von Schnee, abhängig von der Korngröße [6]

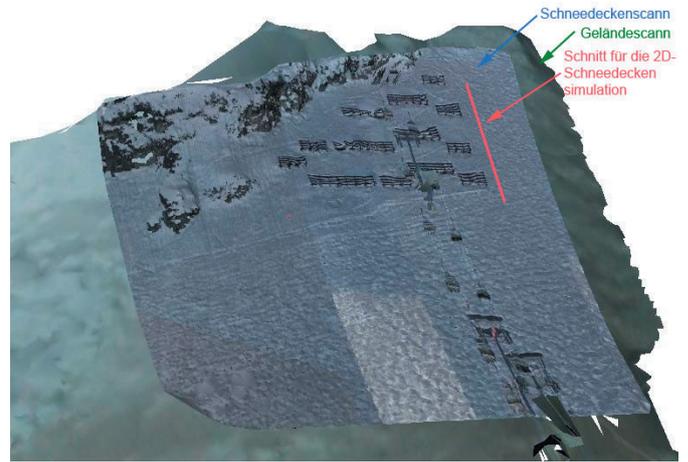


Bild 2 Generierung eines Schnitts der Schneedecke als Grundlage für die Schneedeckensimulation mittels der Scans des Geländes und der Schneedecke

- Reichweite: bei gut reflektierenden Zielen, ($p > 80\%$), 800 m
- Messgenauigkeit: bis zu 15 mm
- Auflösung: bis 1mm
- Messfrequenz: 1000 pkt/sec
- Laserwellenlänge: 0,9 µm (nahes infrarot)
- Laserstrahldivergenz: 1,3 mRad
- Scannbereich: horizontal: 360°
vertikal: -20°/+130°

Für die Wahl des entsprechenden Laserscanners ist vor allem die Wellenlänge des Lasers ausschlaggebend, da die Reflektivität der Schneedecke mit dieser stark variiert. Zusätzlich beeinflussen die Größen der Schneeeinzelkörner die Reflektivität, zu sehen in Bild 1. Weitere wichtige Parameter für die Möglichkeiten und Grenzen der Lasermessung sind die Reichweite, die Messgeschwindigkeit sowie die Laserstrahldivergenz.

Da sich die Geschwindigkeit der Lasers in der Luft mit der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Luftdrucks ändert, müssen diese Parameter mittels üblicher meteorologischen Messinstrumenten gemessen werden, um die atmosphärische Korrektur durchzuführen. Diese ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Laserdistanzmessungen.

2.2 Die Messung

Erstmals ist die flächige Vermessung der Schneehöhen in hoher Auflösung und Genauigkeit möglich.

Um die tatsächliche Schneehöhe zu einem gewissen Zeitpunkt bestimmen zu können muss ein Scann vom Versuchsgebiet ohne Schnee sowie ein Scann von der Schneedecke desselben Gebiets zum gewünschten Zeitpunkt vorliegen. Durch die Bestimmung der Differenz der Scans wird die tatsächliche Schneehöhe errechnet. Um verschiedene Scans miteinander vergleichen zu können, muss jede Scannerposition eingemessen und registriert werden. Dies wird mittels runder 5 cm im Durchmesser großen Reflektoren vorgenommen, die mit dem Scanner einzusehen, und an unbeweglichen Objekten befestigt sind. Durch die Einmessung dieser Reflektoren und somit der Bestimmung der Scannerposition werden Scans vergleichbar.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden einige die Laserdistanzmessung der Schneedecke beeinflussende Faktoren festgestellt. Grundsätzlich ist Schnee, wie die meisten Geländeoberflächen ein diffuser Strahler. Somit hängt die Möglichkeit, den von der Schneedeckenoberfläche reflektierten Laserstrahl zu verarbeiten, in erster Linie vom Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Zielobjekt ab, und erst in zweiter Linie von der Distanz des Zielobjektes zum Laserscanner. Reicht sich die Schneedecke allerdings mit Wasser an, so wird die Reflektivität der Schneedecke stark herabgesetzt. Wie in Bild 3 zu sehen ist, verringert sich die Menge an aufgenommenen Daten desselben Scangebiete bei Zunahme der Feuchtigkeit an der Schneedeckenoberfläche. Weitere limitierende Faktoren sind etwaige schlechte Sicht durch Nebel oder Schneefall, hier ist die Aufnahme brauchbarer Daten unmöglich. Die kurzweilige Strahlung hat ebenfalls Auswirkungen auf die Distanzmessung. Vor allem bei starker Sonnenstrahlung in Richtung des Scanners ist die Intensität der empfangenen Laserstrahlen stark herabgesetzt, ein Verlust an Reichweite ist die Folge.

2.3 Ergebnisse der Lasermessung

Die tatsächliche Genauigkeit der Laserdistanzmessung ist höher je näher das Zielobjekt entfernt ist.

Bei adäquaten Messbedingungen konnte die Laserdistanzmessungen mit zufriedenstellender Genauigkeit durchgeführt werden. Die tatsächlich erreichbare Genauigkeit hängt von verschiedenen Parametern ab. Mit zunehmender Entfernung des Zielobjektes wird der Durchmesser des Laserkegels größer, somit wird eine größere Fläche gemessen, was eine Abnahme an Genauigkeit bedeutet, da die Laufzeit über diese Fläche gemittelt, und nur ein Distanzwert gemessen wird. Die gleichen Auswirkungen hat die Wahl der Scannaufklärung, wird eine geringe Auflösung gewählt, kann lediglich Information in dieser Auflösung erzielt werden. Die Auflösung ist weiters auch winkelabhängig. Man kann somit bei Zielobjekten, die nahe zum Scanner positioniert werden, eine höhere Auflösung des Scans erzielen und somit auch eine höhere tatsächliche Genauigkeit der Messung erreichen. Bild 4 zeigt einen Vergleich einer Lasermessung

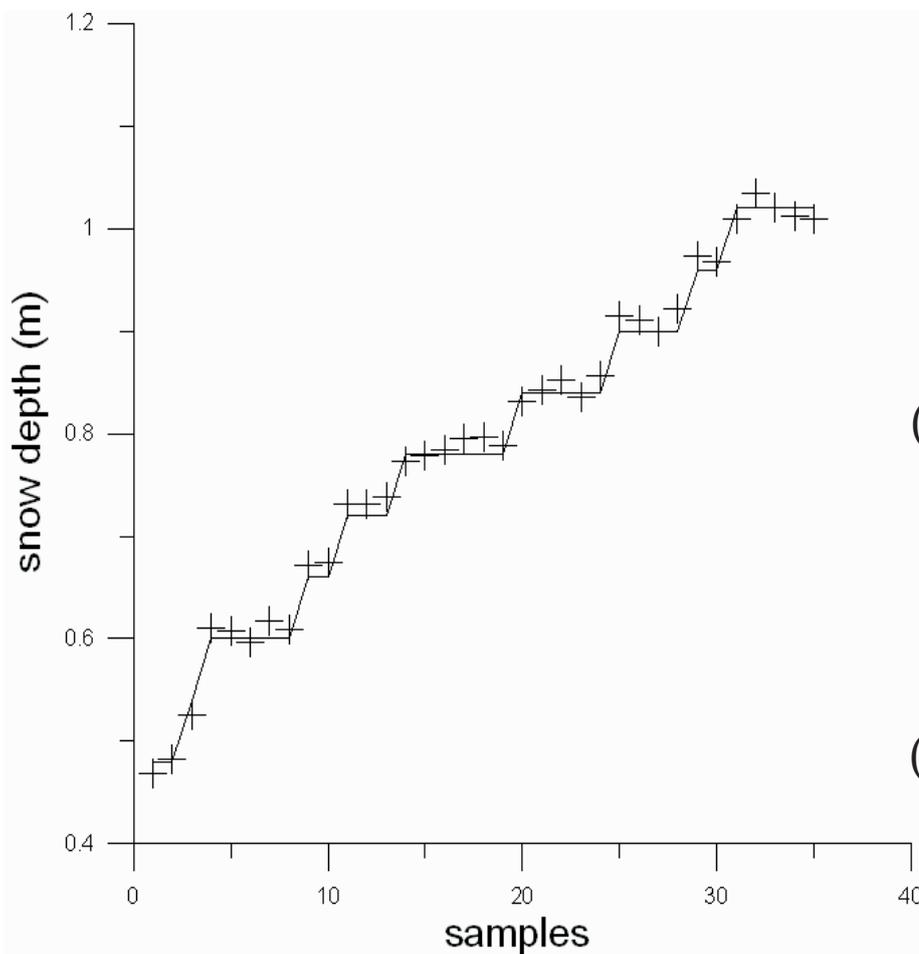


scan	date	area	air temp.	humidity	air pressure	sstemp.	swrad.	cform(surf.)	csize(surf.)	wetness	snow density	% data
KH1	14.03.2005 09:51am	1	-1,8	40%	890	-5	600	3-2	0,3-0,5	1-1	230	85,24
KH3	21.03.2005 12:25pm	1	8	50%	920	0	840	6-6	0,5-1,5	3-3	430	45,86
KH8	24.03.2005 01:58pm	1	12	50%	935	0	750	6-6	0,6-1,8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

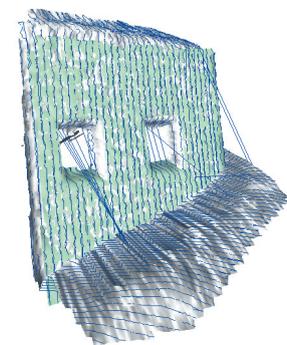
Bild 3 Der Prozentsatz an empfangenen Daten berechnet mittels einer Bilderanalysesoftware. Wenn Feuchtigkeit in der Schneedeckenoberfläche auftritt wurde eine Reduktion des empfangenen Signals von etwa 50% ermittelt, abhängig vom Einfallswinkel des Lasers auf die Schneedecke. (sstemp. ist die Schneedeckenoberflächentemperatur in °C; swrad. ist die kurzwellige Strahlung in W/m²; cform(surf) ist die Kornform und csize.(surf) ist die Korngröße der Schneekristalle an der Schneedeckenoberfläche.)

und photogrammetrischen Auswertungen sowie händisch sondierten Schneehöhen. In 100 m Distanz zum Laserscanner hat hierbei der Laser eine Strahldivergenz von 13 cm. Die Auflösung wurde mit 6 cm vertikal bestimmt, somit wurden für den Vergleich mit den anderen Messmethoden Schneehöhenklassen von 6 cm definiert.

Die Standardabweichung zwischen den verschiedenen Messmethoden beträgt 10 mm, die größte Abweichung einer Einzelmessung 17 mm. Die tatsächliche Genauigkeit der Messung des Zielobjektes in 100 m Entfernung bewegt sich somit im vom Gerätehersteller angegebenen Bereich von ± 15 mm.



(+)



(-)

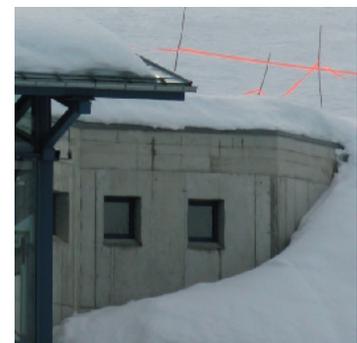


Bild 4 Vergleich einer Lasermessung und photogrammetrischen Auswertungen sowie händisch sondierten Schneehöhen. Die Lasermessung wird durch (+) dargestellt, die Schneehöhe gemessen durch photogrammetrische Analysen und händische Sondierungen wurde gerastert, wobei Klassen von 6 cm Schneehöhe definiert wurden (-)

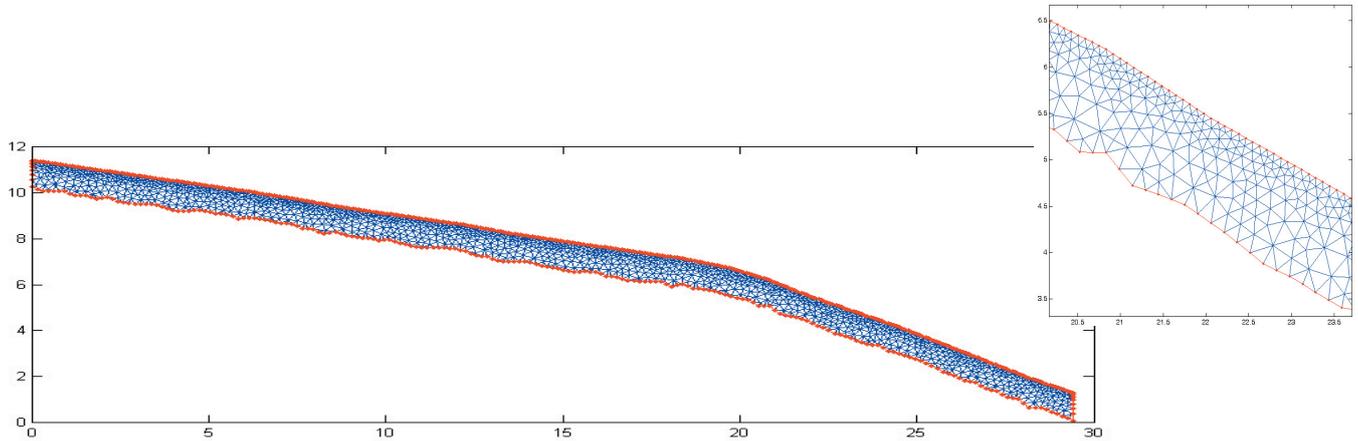


Bild 5 Dreiecksdiskretisierung des Schneedeckenquerschnitts (rechts: vergrößerter Ausschnitt)

3 Zweidimensionale Modellierungen des Temperaturverlaufs in der Schneedecke

Die Modellierung physikalischer Vorgänge in der Schneedecke ist schon seit vielen Jahren Ziel der Schneeforschung. Es wurden bereits detaillierte eindimensionale Schneedeckenmodelle wie zum Beispiel *Snowpack* [7–9] und *Crocus* [10] entwickelt. Neben der eindimensionalen Simulation wurden auch Modellversuche auf vereinfachten, zweidimensionalen Geometrien durchgeführt [11]. Ein neu entwickeltes zweidimensionales Schneedeckensimulationsprogramm bietet die Möglichkeit, entlang beliebig gewählter Hangschnitte (siehe Bild 2) Berechnungen der Temperatur und der Setzung auf einem zweidimensionalen Schneedeckenquerschnitt auszuführen [12]. Im Gegensatz zur eindimensionalen, punktuellen Simulation wird von der zweidimensionalen Erweiterung erwartet, kleinräumige Unterschiede der Temperaturentwicklung leichter lokalisieren zu können, wodurch eine spätere, präzise Schwachschichtberechnung erleichtert werden soll. Weiters können durch den zweidimensionalen Aufbau kontinuumsmechanische Grundlagen zur Berechnung der Setzung und des Kriechens der Schneedecke angewendet werden.

Das Bild 5 zeigt die Diskretisierung des in Bild 2 gewählten Schneedeckenquerschnitts. Mittels Delaunay – Algorithmus wird ein Dreiecksnetz generiert, um mit Hilfe der Finiten Elemente Methode die im Modell verwendeten partiellen Differentialgleichungen lösen zu können. Da die Temperaturschwankungen in den oberen 30 cm der Schneedecke um ein Vielfaches größer sind als in Bodennähe, wird mit zunehmender Nähe zur Oberfläche die Diskretisierung stetig verfeinert. Dadurch können genauere numerische Lösungen des Temperaturfeldes berechnet und dargestellt werden.

Berechnung der Schneetemperaturen über den Energiehaushalt der Schneedecke.

Für die Simulation der zeitlichen Temperaturentwicklung entlang dieses Querschnitts muss eine Reihe an Messdaten in das Modell einfließen. Diese Daten werden mit Hilfe automatischer Messstationen in 10-Minuten-Abständen ermittelt. Die Berechnung der Temperatur kann auf zwei verschiedene Weisen erfolgen. Kennt man die Schneeoberflächentemperaturen, so kann diese als Be-

rechnung herangezogen werden, um die Temperaturen im Inneren der Schneedecke zu berechnen. Da keine flächigen, zeitkontinuierlichen Oberflächentemperaturmessungen zur Verfügung stehen, ist diese Berechnungsweise nur für eindimensionale Modelle möglich. Eine Alternative für die zweidimensionale Modellierung stellt die Berechnung der Energiebilanz der Schneedecke dar. Dafür muss eine zusätzliche Berechnung des Sonnenverlaufes erfolgen, um den Einstrahlwinkel der Sonne auf die unterschiedlich geneigten und exponierten Bergabschnitte zu jedem Zeitpunkt bestimmen zu können. Erst durch diese Berechnung können kurzwellige Strahlungsmessungen der Messstationen auf einen zweidimensionalen Geländeschnitt extrapoliert werden. Einen weiteren Beitrag zur Energiebilanz liefert die langwellige Strahlung, die mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet werden kann. Ein weiterer Energietransport findet durch Dampfdiffusion zwischen Schneedecke und Atmosphäre statt. Einen weitaus größeren Anteil an der Energiebilanz tragen jedoch Umgebungstemperatur und Windströmungen, die ein Erwärmen bzw. Abkühlen der Schneedecke beschleunigen. Ausgehend von der Wärmeleitungsgleichung wird die Energiebilanz über die Robin – Randbedingung, eine erweiterte Neumann Randbedingung, in die Finite Elemente Methode eingebunden.

$$\rho_s(x, y, t) \cdot c_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s(x, y, t) \nabla T(x, y, t)) + Q(x, y, t)$$

Robin – Randbedingung:

$$k_s \frac{\partial T}{\partial n} = g + v \cdot (T_{ext} - T) \quad \text{auf } \Gamma_{Robin}$$

Die Robin – Randbedingung wird an der Schneeoberfläche verwendet, um die Energieflüsse zwischen Atmosphäre und Schneedecke erfassen zu können, wobei zwischen Boden und Schneedecke eine Dirichlet – Randbedingung verwendet wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Bodentemperatur im Verlauf des Winters kaum ändert und immer annähernd 0 °C aufweist. An den linken und rechten Rändern werden homogene Neumann – Randbedingungen verwendet.

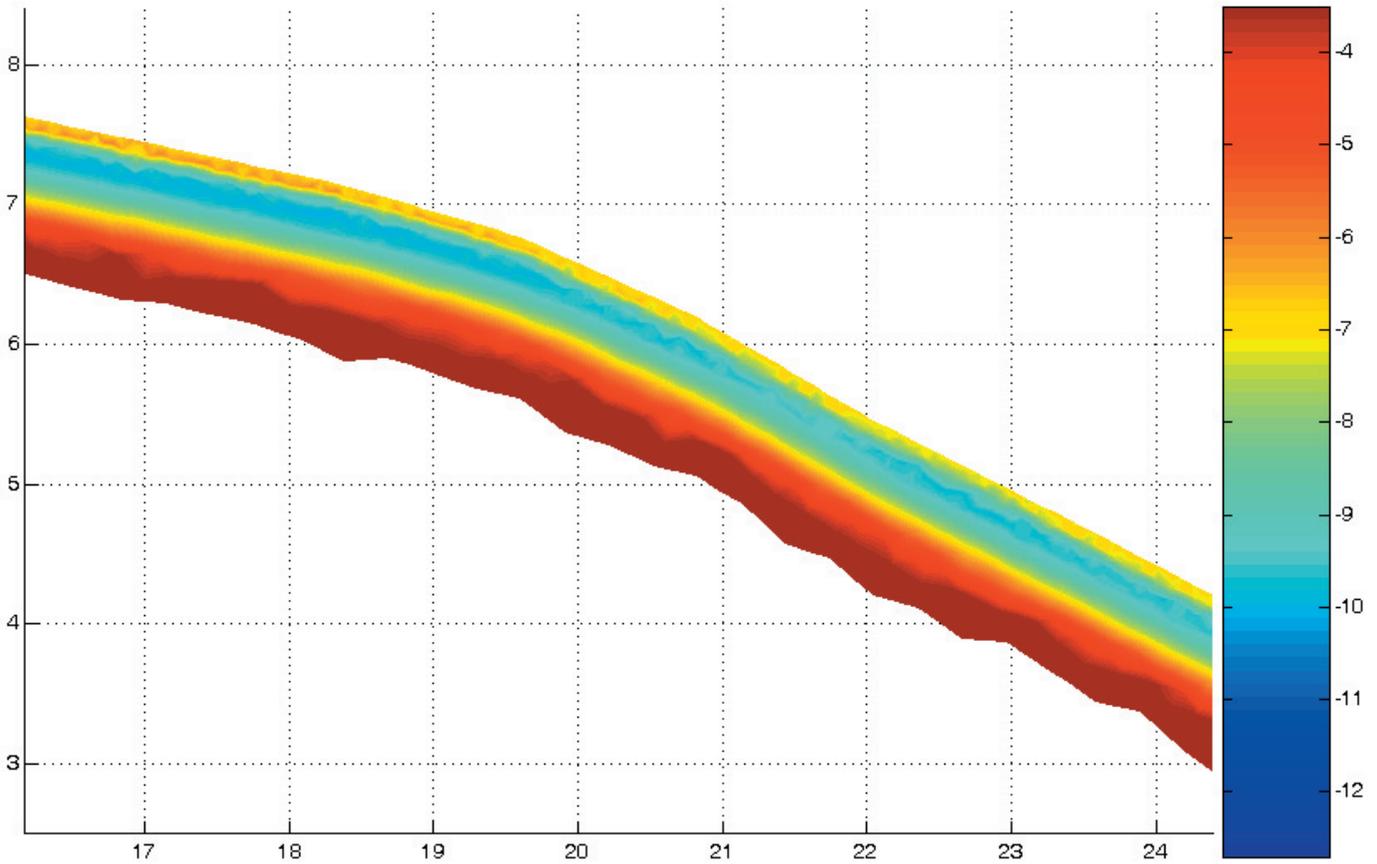


Bild 6 Kleinräumige Temperaturunterschiede auf Grund unterschiedlicher Hangneigungen

Die Simulation der zeitlichen Dichteentwicklung ist Grundlage für die Temperaturberechnung

Für die Berechnung der Schneetemperaturen ist neben der genauen Erfassung der Energiebilanz auch eine möglichst gute Näherung der effektiven Wärmeleitfähigkeit k_s und des Quellterms Q notwendig. Der Quellterm charakterisiert eine Wärmequelle im Inneren der Schneedecke, die durch das Eindringen von kurzwelliger Strahlung ($0,3 \mu\text{m}$ bis $3 \mu\text{m}$) hervorgerufen wird. Die Strahlungsintensität nimmt exponentiell zum Abstand zur Schneeoberfläche ab und hat in etwa 40 bis 60 cm unter der Schneeoberfläche keine Auswirkung mehr auf die Temperaturentwicklung. Die effektive Wärmeleitfähigkeit steigt proportional mit der Dichte an. Die Dichte des Schnees ist daher für die Temperatursimulation von zentraler Bedeutung, da diese sowohl indirekt über die Wärmeleitfähigkeit als auch explizit in die Temperaturberechnung einfließt. Da die Messung der Dichte nicht automatisch erfolgt, wird diese mit Hilfe von Schneeprofilen etwa alle zwei bis drei Wochen ermittelt. Neben den Schneeprofilmessungen besteht die Möglichkeit die Dichte über die Setzungsberechnung herzuweisen.

Die Berechnung der Schneesetzung bezieht sich auf die Gleichgewichtsbedingung des ebenen Spannungszustandes, die Verschiebungs- Verzerrungsbeziehung und ein viskoses Stoffgesetz. Durch Verknüpfung dieser Gleichungen ergibt sich ein partielles Differentialgleichungssystem, dessen Lösung die Verformungsgeschwindigkeit \vec{u} in x- und y-Richtung angibt. Die Setzung der Schneedecke wird vor allem bestimmt durch die dichteabhängige Viskositätszahl η und die Schwerkraft, die als Volumskraft durch den Vektor (q_x, q_y) beschrieben wird.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \cdot \eta \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \\ \ddot{u} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \end{pmatrix}$$

Mit Hilfe der Massenerhaltungsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

wird ausgehend von der Verformungsgeschwindigkeit der Schneedecke die Änderung der Dichte berechnet. Schnee wird dabei als kompressibles Medium betrachtet, dass auf Grund der Setzung kontinuierlichen Änderungen unterworfen ist, die sich auf die Entwicklung der Dichte auswirken. Die partiellen Differentialgleichungen für die Berechnung der Setzung und der Dichte werden mittels Finiter Elemente Methode gelöst. Das Berechnungsgitter (Bild 5) wird sowohl für die Lösung der Wärmeleitungsgleichung als auch für die Setzungsberechnung und Massenerhaltung verwendet.

Im Folgenden werden die berechneten Schneetemperaturen entlang des gewählten Hangschnittes aus Bild 2 grafisch ausgewertet. Die Berechnungen für den 13. März 2005, 11:00 Uhr lassen erkennen, dass auf Grund unterschiedlicher Hangneigungen kleine Temperaturunterschiede im oberflächennahen Bereich entstehen. Im steileren Teil des Querschnittes sind die Oberflächentemperaturen um rund 1°C kleiner als im flachen Bereich (Bild 6).

4 Fazit und Ausblick

Erstmals konnte die Schneedecke flächig von sicheren Standpunkten aus mittels terrestrischer Laserscanner in hoher Auflösung und Genauigkeit vermessen werden. Diese Erfassung der flächigen Schneehöhenverteilung an lawinengefährdeten Hängen bietet Grundlage für viele Anwendungen in der Schnee- und Lawinenforschung, wie für eine zweidimensionale Schneedeckenmodellierung. Die Berechnung von Schwachschichtbildung und Schneemetamorphose ist in diesem Schneedeckenmodell noch nicht realisiert. Die detaillierte Modellierung der Temperaturentstehung in der Schneedecke bildet jedoch eine sehr gute Grundlage, um aufbauend auf das bereits bestehende Modell weitere Eigenschaften der Schneedecke zu berechnen. Durch die Möglichkeit der Temperatursimulation entlang einer gesamten Schnittlinie werden Ergebnisse ermittelt, die die Unterschiede innerhalb eines Abbruchgebietes verdeutlichen und dadurch zu verlässlichen Oberflächenreif- und Metamorphoseberechnung beitragen.

Literatur

- [1] Corripio, J.G., Durand, Y., Guyomarc'h, G., Mérindol, L., Lecorps, D., Puglièse, P., 2004. Land-based remote sensing of snow for the validation of a snow transport model. *Cold Region Science and Technology* 39, 93–104.
- [2] Yankielun, N., Rosenthal W., Davis, R.E., 2004. Alpine snow depth measurements from aerial FMCW radar. *Cold Region Science and Technology* 40, 123–134.
- [3] Rosenthal, W., Dorzier, J., 1996. Automated mapping of mountain snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resour. Res.* 32 (1), 115–130.
- [4] Hopkinson, C., M.N. Demuth, M. Sitar and L.E. Chasmer, 2001, Mapping the Spatial Distribution of Snowpack Depth Beneath a Variable Forest Canopy Using Airborne Laser Altimetry. *Proceedings of the 58th EASTERN SNOW CONFERENCE* Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
- [5] Prokop, A., 2005. Hangbezogene Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung mittels Laserscannern. *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide, and Rock Fall Engineering* nr.154.
- [6] Painter, H., Dorzier, J., 2003. The effect of anisotropic reflectance on imaging spectroscopy of snow properties, *Remote Sensing of Environment* 89 (2004), 409–422.
- [7] Bartelt P., Lehning M., 2002. A physical Snowpack model for the Swiss avalanche warning, Part I: numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35, 123–145
- [8] Bartelt P., Lehning M., 2002. A physical Snowpack model for the Swiss avalanche warning, Part II: snow microstructure. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35, 147–167
- [9] Bartelt P., Lehning M., 2002. A physical Snowpack model for the Swiss avalanche warning, Part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35, 169–184
- [10] Brun E., Martin E., Simon V., Gendre C., Coleou C., 1989. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, Vol. 35, No. 121, 333–342
- [11] Phillips, M., Bartelt, P., Christen M., 2000: Influence of avalanche defence snow supporting structures on ground temperatures in Alpine permafrost terrain, *Annals of Glaciology*, 31, 422–426.
- [12] Teufelsbauer, H., 2005, Hangbezogene Schneedeckentemperatursimulation. *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering* Nr. 154