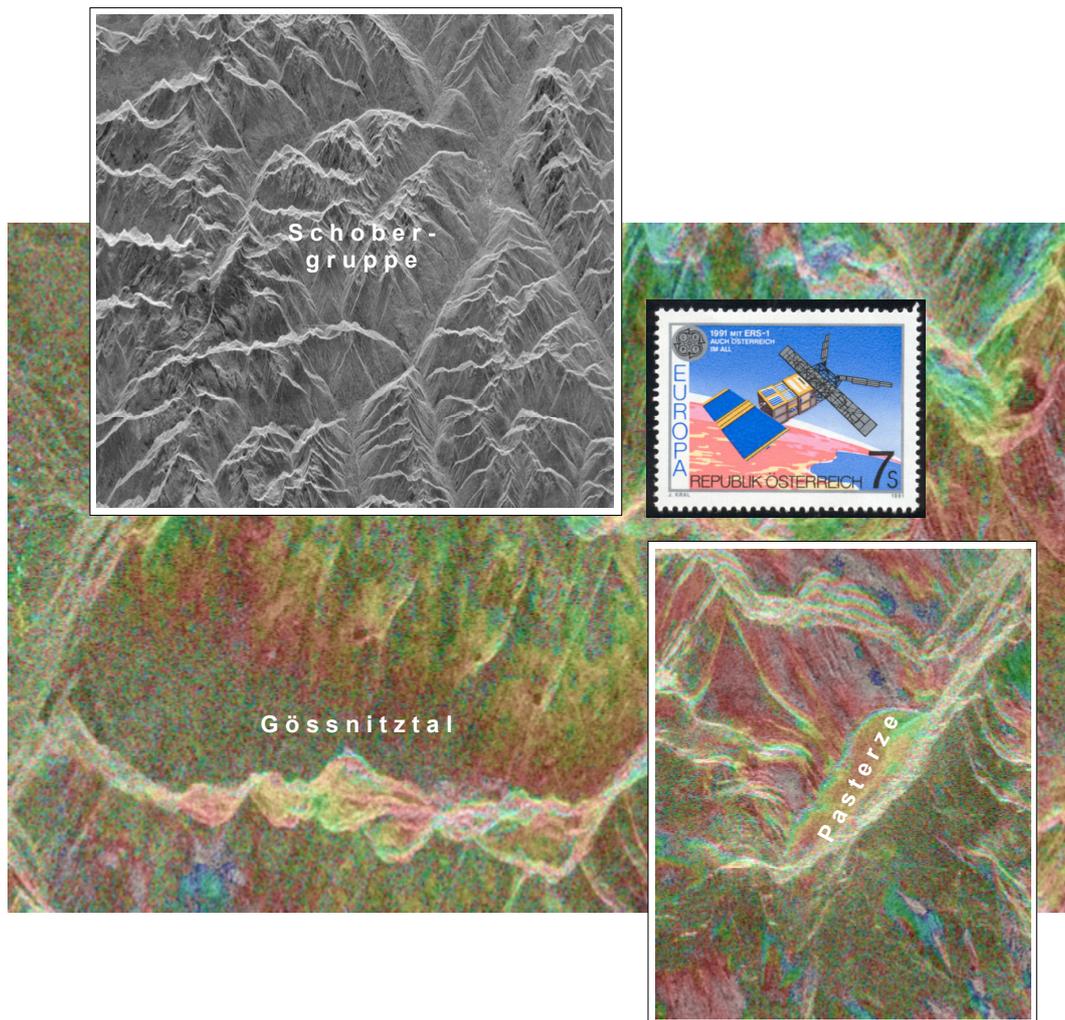


Messung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten)

Forschungsprojekt des Kärntner Nationalparkfonds



Projektleiter

Viktor KAUFMANN
Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, A-8010 Graz

Graz, 2005

Messung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten)

Von Michael AVIAN, Viktor KAUFMANN (Projektleitung) und Lado Wani KENYI

Inhalt

1. Aufgabenstellung	3
2. Grundlagen der Fernerkundung mit Radar	4
Zusammenfassung	4
Literatur	4
3. Gletscher- und Blockgletscher-Monitoring mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie – ein Überblick	5
Zusammenfassung	5
3.1. Einleitung	5
3.2. Gletscher-Monitoring mittels DINSAR	6
3.3. Blockgletscher-Monitoring mittels DINSAR	6
3.3.1. Blockgletscher im Beacon Valley (Ostantarktis)	7
3.3.2. Rothorn Blockgletscher (Schweizer Alpen)	8
3.3.3. Blockgletscher im Äußeren und Inneren Hochebenkar (Öztaler Alpen)	8
3.3.4. Dösener Blockgletscher und Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Hohe Tauern, Österreich)	10
3.4. Resümee	10
3.5. Literatur	10
4. Bewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel des Dösener Blockgletschers (Ankogelgruppe, Hohe Tauern, Kärnten)	13
Zusammenfassung	13
4.1. Einleitung	13
4.2. Differentielle SAR-Interferometrie (DINSAR)	14
4.3. Daten und interferometrische Prozessierungskette	15
4.3.1. Testgebiet und Daten	15
4.3.2. Datenverarbeitung	16
4.3.3. Simulation von Interferogrammen	16
4.4. Quantitative Analyse	17
4.5. Schlussfolgerung	19
4.6. Literatur	20
5. Detektion von aktiven Blockgletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Hohe Tauern, Kärnten)	21
Zusammenfassung	21
5.1. Einleitung	21
5.2. ERS-1/2-Bilddaten	24
5.3. DINSAR-Prozessierung	25
5.4. Bewertung der differentiellen Interferogramme	26
5.5. Zusammenfassung und Ausblick	29
5.6. Literatur	29
6. Zur Topographie und Morphodynamik des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich)	31
Zusammenfassung	31
6.1. Einleitung	31
6.2. Photogrammetrische Bewegungsmessung	32
6.2.1. Automatische Messung von 3D-Verschiebungsvektoren	32
6.2.2. Ergebnisse	32

6.3. Geodätische Bewegungsmessung.....	33
6.3.1. Ergebnisse	33
6.4. Anmerkungen zur Kartenbeilage.....	33
6.5. Zusammenfassung und Ausblick.....	34
6.6. Literatur	34
7. Differenzierung des Blockgletschers Hinteres Langtalkar aufgrund seiner Bewegungsdynamik	35
Zusammenfassung	35
7.1. Einleitung	35
7.2. Bewegungsanalyse	36
7.2.1. Horizontalbewegungen	36
7.2.2. Vertikalbewegungen (Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche).....	37
7.2.3. Überblick über die Bewegungsdynamik	40
7.3. Literatur	42
8. Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten)	43
Zusammenfassung	43
8.1. Einleitung	43
8.2. Die Pasterze	44
8.3. DINSAR-Prozessierung	47
8.4. Ergebnis.....	48
8.5. Zusammenfassung und Ausblick.....	49
8.6. Literatur	56
9. Zusammenfassung und Ausblick	57
Dank.....	58

Anhang: Grundlagen der Fernerkundung mit Radar, Seiten A1-A28.

Beilagen: Luftbildkarte 1:10.000 „Inneres Dösener Tal, Ankogelgruppe“
Luftbildkarte 1:5.000 „Blockgletscher Hinteres Langtalkar“

1. Aufgabenstellung

Mit Hilfe der satellitengestützten differentiellen SAR-Interferometrie (DINSAR) können großräumig und flächendeckend kleinste Verschiebungen der Erdoberfläche im cm-Bereich gemessen werden. Die Weiterentwicklung dieser leistungsfähigen Fernerkundungsmethode und ihre Anwendung in den verschiedensten Erdwissenschaften wurde besonders durch die beiden Satellitenmissionen ERS-1 (1991-2000) und ERS-2 (ab 1995) der Europäischen Weltraumbehörde ESA aber auch durch andere Missionen (Radarsat, J-ERS) gefördert.

Die Anwendungsmöglichkeiten von DINSAR liegen u.a. in der Erfassung von Massenbewegungen wie z.B. Rutschungen, in der Detektion von koseismischen Krustenbewegungen, in der Setzungsmessung der Erdoberfläche bei großräumiger Grundwasserentnahme und durch Untertagebergbau, in der Beobachtung von Vulkanen vor und nach Eruptionen und besonders in der Bewegungsmessung von Gletschern (polare Eiskappen, Schelfeis, Talgletscher) und auch von Permafrostphänomenen.

Die Anwendungspalette der satellitengestützten DINSAR-Methode im Hochgebirge umfasst die Detektion von Massenbewegungen (Hangrutschungen, Talzuschüben, etc.) und die Ermittlung von Geschwindigkeitsfeldern von Gletschern und Blockgletschern (= kriechender Permafrost). Aufgrund der Kleinräumigkeit der zu beobachtenden morphologischen Formen, der zeitlichen Änderung ihrer Oberflächeneigenschaften und der unterschiedlichen Bewegungsmuster sowie insbesondere aufgrund sensorspezifischer Gegebenheiten (Radar-Geometrie, Bahnwiederholzyklen, etc.) ist der erfolgreiche Einsatz von DINSAR in vorhin genannten Hochgebirgsanwendungen erschwert.

Im Rahmen dieses Projekts soll untersucht werden, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen DINSAR – unter Verwendung von ERS-1/2-Bilddaten – für die Messung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern und Blockgletschern im Nationalpark Hohe Tauern eingesetzt werden kann. Da der Kenntnisstand bezüglich Blockgletscher derzeit noch unbefriedigend ist, soll der Schwerpunkt der praktischen Studien auf dem Einsatz von DINSAR im Blockgletscher-Monitoring liegen. Als Studiengebiet wird von der Projektgruppe die Schobergruppe vorgeschlagen. Hier befinden sich zahlreiche Blockgletscher, aber auch kleinere Kargletscher. Für die Überprüfung der interferometrischen Messergebnisse sollen genaue Vergleichsdaten – sofern sie noch nicht vorhanden sind – ebenfalls bereit gestellt werden.

Im Detail sollen folgende Themen bzw. Fragenkomplexe behandelt werden:

- Darstellung der methodische Grundlagen zur interferometrischen Bewegungsmessung mit besonderer Berücksichtigung von Hochgebirgsanwendungen
- Anpassung der am Institut für Digitale Bildverarbeitung (Joanneum Research Graz) entwickelten Interferometrie-Software an die speziellen Bedürfnisse der Hochgebirgsanwendung
- Untersuchungen zur optimalen SAR-Aufnahmegeometrie
- Untersuchungen zum optimalen Aufnahmezeitpunkt der SAR-Bilddaten
- Untersuchungen zur Kohärenz
- Anwendung der DINSAR-Methode an ausgewählten Gletschern und Blockgletschern
- Darlegung der zukünftigen Möglichkeiten der satellitengestützten Radar-Interferometrie im Gletscher- bzw. Blockgletscher-Monitoring.

Über das Forschungsprojekt ist ein Abschlussbericht zu verfassen.

2. Grundlagen der Fernerkundung mit Radar

V. KAUFMANN

Zusammenfassung

Gegen Ende des 19. Jh. wurde die Erkenntnis gewonnen, dass Mikrowellen an festen Gegenständen reflektiert werden. Ab 1920 wurden bereits Radarsysteme – *Radar* ist ein Akronym für „*Radio Detection and Ranging*“ – im Schiffs- und Flugzeugverkehr zur Lokalisierung von sich bewegenden Objekten eingesetzt. Während des 2. Weltkriegs wurde die Navigation und Erkundung mit Hilfe einer rotierenden Antenne (*PPI ... plan-position indicator*) weiterentwickelt. Die Anwendung der Radartechnologie war vorerst nur auf militärische Zwecke beschränkt. Erst später konnten zivile Anwendungen erschlossen werden. Ab 1950 kam es zur Entwicklung der bildgebenden Seitensicht-Radarsysteme mit realer Apertur (= *SLAR ... side-looking airborne radar*). Mit Beginn der 70er-Jahre verstärkte sich der Einsatz der bildgebenden Radarsysteme in der Fernerkundung der Erdoberfläche. Dies wurde u.a. erst durch die Entwicklung von Seitensicht-Radarsystemen mit synthetischer Apertur (= *SAR ... synthetic aperture radar*) ermöglicht. Somit waren die Voraussetzungen gegeben, auch von Fernerkundungssatelliten aus hochauflösende Radarbilder aufzunehmen. In den 90er-Jahren wurde die Radar-Interferometrie für die großräumige Generierung von digitalen Geländemodellen und für die Detektion kleinster Bewegungen/Verschiebungen der Erdoberfläche weiterentwickelt. Besondere Impulse wurden durch die beiden höchst erfolgreichen ERS-Mission, ERS-1/2, der Europäischen Weltraumbehörde ESA ausgelöst. Der interessierte Leser ist eingeladen, die physikalischen und geometrischen Grundlagen der Radar-Fernerkundung der Erde im Anhang dieser Publikation nachzuschlagen. Das Konzept der Radar-Interferometrie wird ebenfalls erläutert. Einige wichtige satellitengestützte Radarsysteme wie z.B. ERS-1/2 werden kurz vorgestellt. Um den Umfang dieser Publikation nicht zu sprengen, wird an dieser Stelle nur auf weiterführende deutschsprachige Literatur verwiesen.

Literatur

- FRICK, H. & KALLIANY, R., 1996: Ein Software-System zur interferometrischen Bearbeitung von ERS-1 Radarbildern. *Österr. Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 84 (2), 144-151.
- GEUDTNER, D., 1995: Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DLR-Forschungsbericht 95-28, 141 S.
- HARTL, PH. & THIEL, K.-H., 1993: Bestimmung von topographischen Feinstrukturen mit interferometrischem ERS-1-SAR. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 61 (3), 108-114.
- HARTL, PH. & XIA, Y., 1993: Besonderheiten der Datenverarbeitung bei der SAR-Interferometrie. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 61 (6), 214-222.
- HARTL, PH., THIEL, K.-H., WU, X. & XIA, Y., 1998: SAR-Interferometrie: Grundlagen und Anwendungsbeispiele. In: GOSSMANN, H. (Hrsg.), *Patagonien und Antarktis – Geofernerkundung mit ERS-1-Radarbildern*. Petermanns Geographische Mitteilungen, Ergänzungsheft 287, 35-52.
- KRAUS, K. & SCHNEIDER, W., 1988: *Fernerkundung – Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 291 S.
- KRONBERG, P., 1985: *Fernerkundung der Erde – Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 394 S.
- RABUS, T.R. & LANG, O., 2001: Anwendungsbeispiele der differentiellen SAR-Interferometrie. In: SEYFERT, E. (Hrsg.), *Vorträge 21. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Konstanz, Deutschland, Publikationen der DGPF* 10, 9 S.
- ROTT, H., MAYER, CH. & NAGLER, TH., 2001: Einsatzmöglichkeiten der Radarinterferometrie zur Überwachung von Hangbewegungen und Absenkungen. *Österr. Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 89 (3), 167-172.
- SCHWÄBISCH, M., 1995: Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DLR-Forschungsbericht 95-25, 125 S.
- SIEBER, A.J., 1986: *Physikalische Grundlagen der Fernerkundung*. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DFVLR-FB 86-37, 180 S.
- WU, X., 1998: Anwendungen der satellitengestützten-Radarinterferometrie zur Bestimmung von Topographie und Geschwindigkeitsfeldern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 499, 103 S.

3. Gletscher- und Blockgletscher-Monitoring mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie – ein Überblick

V. KAUFMANN

Zusammenfassung

Die Erfassung der raum-zeitlichen Veränderungen von glazialen und periglazialen Landschaftsformen der Erde ist für viele naturwissenschaftliche Fragenstellungen wie z.B. die Klimaveränderung von großer Bedeutung. Mit den frühen satellitengestützten Fernerkundungssensoren der 70er-Jahre war man erstmals in der Lage, nahezu alle vergletscherten Gebiete der Erde in regelmäßigen Zeitintervallen flächendeckend zu kartieren. Die großräumige Erfassung der Fließgeschwindigkeit von arktischem Inlandeis, Schelfeis, Seeis und auch von Talgletschern wurde durch die satellitengestützte differentielle SAR-Interferometrie (DINSAR) erstmals ermöglicht. Diese Technologie bekam besonders in den 90er-Jahren durch die beiden europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1/2 entscheidende Impulse. Die glaziologiebezogenen Anwendungen von DINSAR sind zahlreich und auch gut in der Literatur dokumentiert. Entsprechende Anwendungen in der Permafrostforschung sind derzeit noch selten; sie werden jedoch mit der sog. „Demokratisierung“ der Radar-Interferometrie in der Zukunft zahlreicher werden. Insbesondere eignet sich DINSAR für die großräumige Detektion von Blockgletschern und dann in weiterer Folge zur genauen Erfassung ihrer Fließgeschwindigkeit. In diesem Beitrag werden u.a. ausgewählte Anwendungsbeispiele im Bereich Blockgletscher-Monitoring vorgestellt.

3.1. Einleitung

Gletscher (PATERSON 1994) und Blockgletscher (BARSCH 1996) sind zwei typische Landschaftselemente, welche den Hochgebirgscharakter unserer Alpen auf besondere Art und Weise prägen. Die dynamische Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes von (Eis-)Gletschern wird vom Menschen – seitdem er den Hochgebirgsraum für sich als Lebensraum in Anspruch genommen hat – stets mit großem Interesse verfolgt (vgl. BRUNNER 1987, FINSTERWALDER 1954, VISCHER 1997). Blockgletscher rückten erst vor etwa 10 Jahren vermehrt in den Blickwinkel der Forscher (vgl. LIEB 1996 und KAUFMANN 1996 für Österreich). Blockgletscher sind im Vergleich zu Gletschern kleiner und unauffälliger (für einen Beobachter auf der Erdoberfläche); sie ändern ihr Erscheinungsbild nur sehr geringfügig im Laufe der Zeit. Die genaue Vermessung dieser beiden „Gletscher“-Typen verfolgt das Ziel, die zeitliche Änderung ihrer morphometrischen Zustandsparameter, wie z.B. Fläche, Volumen und Fließgeschwindigkeit, genau zu erfassen. Aktuelles Zahlenmaterial wird u.a. von der Elektrizitätswirtschaft, von Betreibern von Gletscherschigebieten, Kartographen, Geographen, Glaziologen und nicht zuletzt von Klimatologen eingefordert.

Die vorhin erwähnten Kenngrößen spiegeln in hohem Maße regionale bzw. globale Klimaänderungen wider. Um die langperiodischen (systematischen) Anteile von den kurzperiodischen, mehr oder weniger zufälligen Schwankungen trennen zu können, ist ein Langzeit-Beobachtungsprogramm (*long-time monitoring*) unumgänglich. Die direkten bzw. indirekten Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Umwelt werden z.B. in HAEBERLI 1992 und BADER & KUNZ 1998 am Beispiel des Schweizer Alpenraumes diskutiert.

Im Laufe der Zeit wurden verschiedenste Vermessungsmethoden, wie z.B. Tachymetrie, terrestrische Photogrammetrie, Aerophotogrammetrie und Positionierung durch das GPS, zur Kartierung und Beobachtung der beiden Landschaftsformen eingesetzt. Alle hier angeführten Methoden haben ihre Vor- und Nachteile (vgl. LIEB et al. 1999 für Gletscher bzw. KAUFMANN & HEILAND 1998 für Blockgletscher). Aber allen Methoden ist gemeinsam, dass aufgrund des großen Kostenaufwandes nur ausgewählte Gletscher bzw. Blockgletscher in ein permanentes Monitoring dieser Art eingebunden werden können. Klimamodelle benötigen jedoch nicht nur genaue Messdaten, sondern auch eine entsprechende räumliche Verteilung derselben über größere Regionen, um signifikante Aussagen treffen zu können. Dies kann nur mit Hilfe der satellitengestützten Fernerkundung sinnvoll gelöst werden. Hierbei können passive bzw. aktive Fernerkundungssensoren zum Einsatz kommen (vgl. KÄÄB & HAEBERLI 2004). Die aktive Fernerkundungsmethode benutzt Radar. Mit Hilfe der satellitengestützten Radar-Interferometrie (eine gute Einführung zu diesem Thema geben ROCCA et al. 1997 und HENDERSON & LEWIS 1998) können flächendeckend digitale Geländemodelle (DGM) mit einer Genauigkeit von einigen Metern und in der differentiellen Anwendung (DINSAR) kleinste Verschiebungen der Geländeoberfläche mit einer Genauigkeit im cm- bzw. mm-Bereich abgeleitet werden.

In Österreich weisen das Institut für Digitale Bildverarbeitung (Joanneum Research, Graz), das Institut für Meteorologie und Geophysik (Universität Innsbruck) sowie ENVEO (Environmental Earth Observation Information Technology GmbH, Innsbruck) Expertise und mehrjährige Erfahrung in der interferometrischen Prozessierung von Radar-Bilddaten auf.

3.2. Gletscher-Monitoring mittels DINSAR

Durch den Start der beiden europäischen Fernerkundungsatelliten ERS-1 (1991-2000) bzw. ERS-2 (1995-jetzt), welche baugleiche SAR-Sensoren an Bord haben, wurde die DINSAR-Methode für Fragestellungen der Kryosphärenforschung wesentlich weiterentwickelt. In der Literatur sind zahlreiche Anwendungsbeispiele dokumentiert:

- Meereis: DAMMERT et al. 1998;
- Eiskappen/-felder, outlet glacier: RACK et al. 2004, FROLICH & DOAKE 1998, JOUGHIN et al. 1998, ROTT et al. 1998, ROTT & SIEGEL 1997, KWOK et al. 1996; RIGNOT et al. 1995;
- Schelfeis: RIGNOT 1997;
- Tal- bzw. Gebirgsgletscher: GUTJAHR et al. 2004, SROZZI et al. 2003d, SHAROV & ETZOLD 2003, NAGLER et al. 2002a, MATTAR et al. 1998, ROTT & SIEGEL 1997.

Im alpinen Bereich ist neben der Gletscherbeobachtung auch die Detektion und Dokumentation von Massenbewegungen^{1, 2} wie z.B. von Rutschungen von großem Interesse. Auch hier kann DINSAR erfolgreich eingesetzt werden (NAGLER et al. 2002b). Bestehende Forschungsdefizite in der Beobachtung von Oberflächenveränderungen (Gletscher, Rutschhängen, etc.) für den alpinen Bereich mittels DINSAR werden z.B. in ROTT et al. 2003 und STROZZI et al. 2002 angesprochen.

3.3. Blockgletscher-Monitoring mittels DINSAR

Obwohl die Radar-Fernerkundung aus dem erdnahen Weltraum in der Gletscherbeobachtung in den letzten Jahren nahezu operationellen Charakter erreicht hat, ist doch ihre Anwendung in der Kartierung von Permafrost noch nicht weit verbreitet. Dies spiegelt sich auch in der eher bescheidenen Anzahl von fach einschlägigen Publikationen wider (siehe nachfolgende Fallbeispiele). DINSAR eignet sich im besonderen Maße dazu, aktive Blockgletscher in den Radarbildern zu detektieren und gegebenenfalls deren Kriech-/Fließbewegung zu quantifizieren. Aufgrund der hohen (relativen) Messgenauigkeit von DINSAR können kleinste Bewegungen von Blockgletschern, aber auch von anderen Hanginstabilitäten mit einer Auflösung von wenigen Millimetern bzw. Zentimetern festgestellt werden. Dies ist jedoch nur unter gewissen Voraussetzungen möglich (STROZZI et al. 2004). Ein Großteil der in dieser Referenz genannten Voraussetzungen gilt generell auch für alle anderen DINSAR-Anwendungen. Besonders erschwert ist die Durchführung von DINSAR im Hochgebirge. Maßgeblich für den erfolgreichen Einsatz der Radar-Interferometrie im „Gletscher“-Monitoring ist die Kohärenz der aufgezeichneten Radarsignale, welche im besonderen Maße von den Objekteigenschaften wie z.B. Feuchtigkeit, Schneebedeckung, Stabilität der Oberflächenstrukturen abhängt. Auf eine detaillierte Diskussion wird an dieser Stelle verzichtet. Es wird stattdessen auf Kap. 8 verwiesen.

WANG & LI 1999 konnten erstmals großräumig die Deformation (Heben und Senken) eines Permafrostbodens in Alaska (Brooks Range) durch ERS-1/Radar-Interferogramme messtechnisch erfassen. Die durch Gefrier- und Tauprozesse verursachte differentielle Deformation der obersten Auftauschichte wurde mit ca. 1 cm Höhenänderung abgeschätzt.

In weiterer Folge sollen nun ausgewählte Anwendungsbeispiele (Antarktis, Schweiz, Österreich) kurz vorgestellt werden.

¹ Vgl. dazu das Forschungsprogramm MUSCL (Monitoring Urban Subsidence, Cavities, and Landslides by remote sensing), 5. Rahmenprogramm der EU, <http://dude.uibk.ac.at/projects/MUSCL/>.

² Vgl. dazu die IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction)-Forschungsprojekte am Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, <http://dude.uibk.ac.at/projects/IDNDR/>.

3.3.1. Blockgletscher im Beacon Valley (Ostantarktis)

In der Literatur konnte bisher nur eine einzige Quelle über Blockgletscher-Beobachtung mittels DINSAR für den gesamten außereuropäischen Raum aufgefunden werden. RIGNOT et al. 2002 ermittelten die Fließgeschwindigkeit von zwei Blockgletschern (Mullins und Friedman Blockgletscher, siehe Abb. 1) im Beacon Valley (McMurdo Dry Valleys Region, Ostantarktis) aus einem ERS-Interferogramm. Die beiden Radarbilder des Interferogramms wurden in einem zeitlichen Abstand von 3,36 Jahren aufgenommen und weisen eine Basislinienkomponente von 7 m quer zur SAR-Blickrichtung auf.

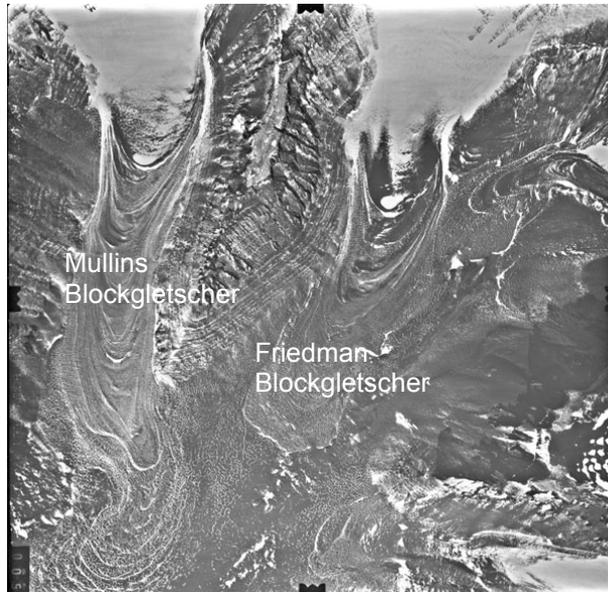


Abb. 1: Mullins und Friedman Blockgletscher im Beacon Valley, Ostantarktis.
(Quellenangabe: RIGNOT et al. 2005,
<http://www.ess.washington.edu/qrc/beacon.html>)

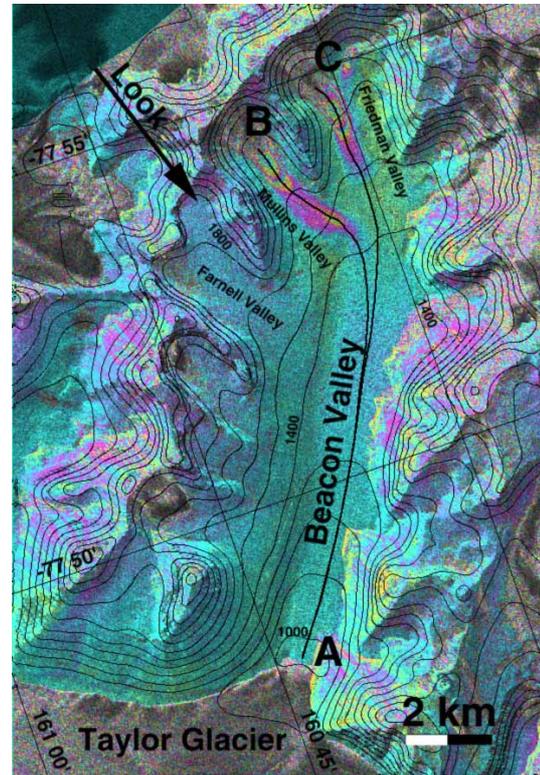


Abb. 2: Geometrisch entzerrtes und farb-kodiertes ERS-1/2 SAR-Interferogramm des Beacon Valley. Ein Phasen-/Farbzyklus entspricht einer Verschiebung von 28 mm in SAR-Blickrichtung (*Look*). Die Prozessierung der Radardaten erfolgte am Jet Propulsion Laboratory (JPL) Pasadena, USA.
(Quellenangabe: RIGNOT et al. 2005,
<http://www.ess.washington.edu/qrc/beacon.html>)

Aufgrund der äußerst geringen Niederschläge (Schneefall) und der tiefen Bodentemperaturen ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ mittlere jährliche Bodentemperatur) konnte eine ausgezeichnete Kohärenz der Radarsignale über diesen langen Zeitraum festgestellt werden. Der topographisch induzierte Phasenanteil wurde über ein digitales Geländemodell (30 m Rasterweite) des USGS bestmöglich eliminiert. Das Phasenrauschen wird mit $\pm 2\text{ mm}$ für den Talboden des Beacon Valley und mit $\pm 6\text{ mm}$ für den gebirgigen Bereich des Auswertgebietes angegeben. Die Angaben beziehen sich auf die Schrägentfernung bei einem Beobachtungszeitraum von 3,36 Jahre. Für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit wurde hangparalleles Fließen angenommen. Die mittlere jährliche horizontale Fließgeschwindigkeit der beiden Blockgletscher wurde mit 10-20 cm/Jahr ermittelt, wobei die Maximalwerte bei etwa 40 cm/Jahr liegen. Die erzielten Messergebnisse flossen in eine Modellierung des im Permafrost der Talregion gebundenen Eises ein.

3.3.2. Rothorn Blockgletscher (Schweizer Alpen)

Umfangreiche Studien zur Detektion und Fließgeschwindigkeitsmessung von Blockgletschern mittels DINSAR wurden in den letzten Jahren von einem schweizerischen Forscherteam durchgeführt. Die diesbezüglichen Arbeiten sind gut dokumentiert (STROZZI et al. 2004, STROZZI et al. 2003a, 2003b, 2003c und 2004). Im Gebiet des Fletschhorn (Simplon/Saas-Region, Schweizer Alpen) wurden mehrere Blockgletscher, darunter auch der bekannte Gruben Blockgletscher, mittels DINSAR auf ihre Bewegungsaktivität hin untersucht. Zur Auswertung wurden 18 SAR-Bilder (Zeitraum 1995-1999) von ERS-1 und ERS-2 und weitere 7 SAR-Bilder (Zeitraum 1993-1996) des japanischen Fernerkundungssatelliten JERS-1 herangezogen.

Während bei ERS-1/2 (C-Band) eine Phasenänderung von 2π einer Verschiebung von 2,8 cm entspricht, liegt dieser Wert bei JERS-1 (L-Band) bei 11,8 cm.

Die interferometrische Prozessierungskette und die Auswertergebnisse sind ausführlich in STROZZI et al. 2004 beschrieben (vgl. dazu Abb. 3). Für die Validierung der interferometrisch ermittelten Verschiebungen konnte auf digital-photogrammetrischem Wege sehr genau bestimmte Vergleichsdaten zurückgegriffen werden. Somit konnten aussagekräftige Schlüsse über die Anwendbarkeit von DINSAR für das Blockgletscher-Monitoring gezogen werden. Die interferometrische Prozessierung erfolgte durch GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG, Bern (siehe GAMMA 2005)

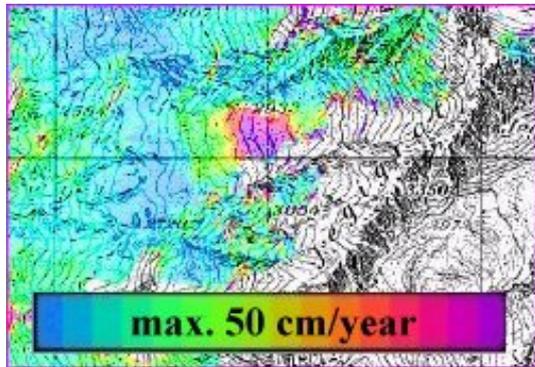


Abb. 3: Thematische Karte der aus JERS-1 DINSAR-Daten abgeleiteten Bewegung des Rothorn Blockgletschers (Schweizer Alpen). Die ermittelten Oberflächenverschiebungen sind farbkodiert dargestellt. Das Bewegungsmuster ist in guter Übereinstimmung mit den photogrammetrisch ermittelten Vergleichsdaten. Die größten Bewegungsbeträge – oberflächenparalleles Fließen wurde angenommen – sind in der Blockgletschermitte gemessen worden. Quelle: <http://www.gamma-rs.ch/>.

3.3.3. Blockgletscher im Äußeren und Inneren Hochebenkar (Öztaler Alpen)

Die Blockgletscher Äußeres und Inneres Hochebenkar (vgl. Abb. 4) liegen in den Öztaler Alpen. Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar wird schon mehrere Jahrzehnte lang intensiv erforscht (HAEBERLI & PATZELT 1982, KAUFMANN & LADSTÄDTER 2002). Insbesondere zeichnet sich dieser Blockgletscher wegen seiner besonders langen geodätischen Beobachtungsreihe aus (SCHNEIDER & SCHNEIDER 2001). Neben photogrammetrischen Bewegungsmessungen (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2003) liegen nun auch interferometrische Ergebnisse aus ERS SAR-Bilddaten vor. Die am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck durchgeführten Arbeiten sind in ROTT & SIEGEL 1999 bzw. NAGLER et al. 2002a publiziert. Das genannte Institut (<http://dude.uibk.ac.at>) ist für seine Expertise in der satellitengestützten Fernerkundung von arktischen und alpinen Gebieten weltweit bekannt.

Zwei 35-tägige ERS-1 SAR-Interferogramme des Sommers 1995 konnten erfolgreich ausgewertet werden. Die topographische Phase wurde aus eintägigen ERS SAR-Bildpaaren der Tandem-Mission geschätzt. Bei den Ergebnissen, welche in NAGLER et al. 2002a publiziert sind, konnte durch Anwendung der „Multi-baseline“-Technik eine Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Abb. 5 zeigt ein über mehrere SAR-Szenen gemitteltes Amplitudenbild des Studiengebietes. Die durch die DINSAR-Prozessierung eines der beiden ERS-Bildpaare ermittelte Oberflächenbewegung der beiden Blockgletscher ist in Abb. 6 graphisch dargestellt.

Die auf diese Weise sichtbar gemachte Bewegung der beiden Blockgletscher ermöglichte neue Erkenntnisse bezüglich ihrer Kinematik. Diese Aussagen konnten durch photogrammetrische Messungen bestätigt werden. Sowohl bei der DINSAR-Auswertung als auch bei der photogrammetrischen Messung konnte im Bereich des Zungenendes des Blockgletschers Äußeres Hochebenkar kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden, da die dortigen Bewegungen zu groß und die Beobachtungsintervalle zu lang waren. Im Fall der Radarmessung war die notwendige Kohärenz der SAR-Signale nicht gegeben.

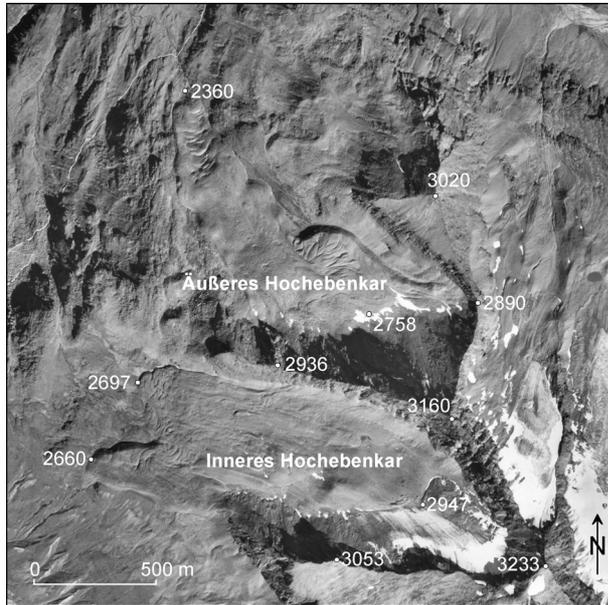


Abb. 4: Orthophoto mit den Hochebenkar Blockgletschern. Luftbildaufnahme vom 11.9.1997.

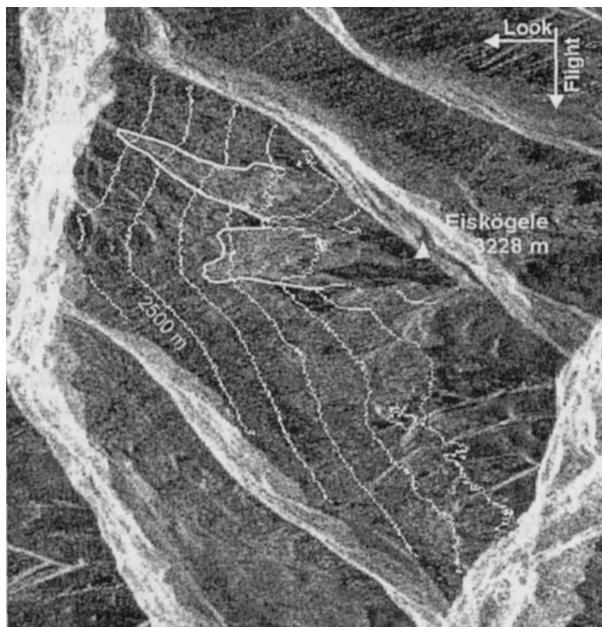


Abb. 5: Über mehrere ERS SAR-Bild Datensätze gemittelt Amplitudenbild der beiden Hochebenkar Blockgletscher (mit weißer Linie umrandet). Die 100 m-Höhenschichtlinien wurden durch INSAR bestimmt.

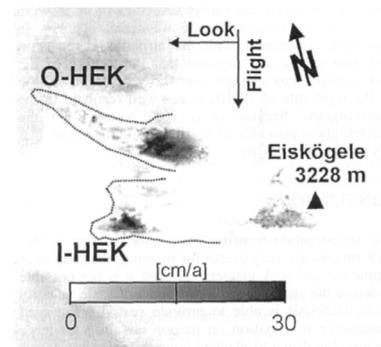


Abb. 6: Darstellung der durch DINSAR ermittelten Oberflächenverschiebung der beiden Hochebenkar Blockgletscher. Die Ergebnisse wurden aus dem ERS Bildpaar 20.7.1995/23.8.1995 abgeleitet.

3.3.4. Dösener Blockgletscher und Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Hohe Tauern, Österreich)

Neben den beiden Blockgletschern im Äußeren und Inneren Hochebenkar wurden auch der Dösener Blockgletscher (Ankogelgruppe, Hohe Tauern, Kärnten) und der Blockgletscher Hinteres Langtalkar (Schobergruppe, Hohe Tauern, Kärnten) mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie untersucht (siehe separate Beiträge, Kap. 4 und Kap. 5, in diesem Bericht). Beide Blockgletscher liegen in der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern.

Im Jahre 1999 konnten die ersten ERS SLC-Bilddaten im Rahmen eines ESA „Category-1 Project Announcements“ für eine interferometrische Bildanalyse beschafft werden. Erste Ergebnisse für den Dösener Blockgletscher sind in KENYI & KAUFMANN 2000 publiziert. Weitere Veröffentlichungen erfolgten in KENYI & KAUFMANN 2001, 2003a und 2003b. Die Abschlussdokumentation erfolgt in diesem Bericht (Kap. 4).

Für das Beispiel des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar erfolgt in dieser Publikation die Erstpräsentation (Kap. 5).

Die interferometrische Prozessierung der SAR-Bilddaten erfolgte am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Graz.

3.4. Resümee

Das Literaturstudium hat gezeigt, dass DINSAR sehr häufig für glaziologische Zwecke eingesetzt wird. Im Gegensatz dazu sind die Anwendungen dieser Technologie im Blockgletscher-Monitoring noch eher spärlich. Dies liegt einerseits daran, dass es flächenmäßig viel mehr Gletscher als Blockgletscher gibt, und andererseits, dass die Permafrost-/Blockgletscherforschung eine vergleichsweise junge Disziplin ist. Die gezeigten Fallbeispiele sind jedenfalls vielversprechend.

3.5. Literatur

- BADER, ST. & KUNZ, P., 1998: Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz. Wissenschaftlicher Schlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP 31, vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, 307 S.
- BARSCHE, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer Series in Physical Environment 16, Springer Verlag, 335 S.
- BRUNNER, K., 1987: Glacier mapping in the Alps (with 3 map sheets). - Mountain Research and Development, 7 (4), 375-385.
- DAMMERT, P.B.G., LEPPÄRANTA, M. & ASKNE, J., 1998: SAR interferometry over Baltic Sea ice. International Journal of Remote Sensing 19 (16), 3019-3037.
- FINSTERWALDER, R., 1953: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie 2 (2), 189-239.
- FROLICH, R.M. & DOAKE, C.S.M., 1998: Synthetic aperture radar interferometry over Rutford Ice Stream and Carlson Inlet, Antarctica. Journal of Glaciology 44 (146), 77-92.
- GUTJAHR, K., RAGGAM, H. & FRANKE, M., 2004: Potentials and limitations of Alpine glacier monitoring using differential SAR interferometry. Proceedings of 4th Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 148-155.
- HAEBERLI, W. & PATZELT, G., 1982: Permafrostkartierung im Gebiet der Hochebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 18 (2), 127-150.
- HAEBERLI, W., 1992: Construction, Environmental Problems and Natural Hazards in Periglacial Mountain Belts. Permafrost and Periglacial Processes 3, 111-124.
- HENDERSON, M. & LEWIS, A.J., (Eds.) 1998: Principles and applications of imaging radar. Manual of Remote Sensing, 3rd ed., vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 866 pp. with color plates.
- JOUGHIN, I.R., KWOK, R. & FAHNESTOCK, M.A., 1998: Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (1), 25-37.
- KAUFMANN, V., 1996: Der Dösener Blockgletscher - Studienkarten und Bewegungsmessungen. In: LEITNER, W. (Hrsg.), Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich. Arbeiten aus dem Institut f. Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz 33, 141-162.

- KAUFMANN, V. & HEILAND, R., 1998: Zur Morphometrie des Dösjener Blockgletschers (Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). In: KRIZ, K., (Hrsg.), Hochgebirgskartographie - Silvretta '98 - High Mountain Cartography, Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie 11, 102-114.
- KAUFMANN, V. & LIEB, G.K., 1999: Investigations on the retreat of two small cirque glaciers (Göbñitz- and Hornkees) in the Austrian Alps, Europe. Proceedings of 5th Int. Symp. on High Mountain Remote Sensing Cartography, Karlstad, Sweden, Karlstad University Studies 2002:27, 75-82.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2002: Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hohebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. Proceedings of 6th Int. Symp. on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 37, 119-139.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2003: Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: Two case studies in the Austrian Alps. Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, Vol. 1, 525-530.
- KÄÄB, A. & HAEBERLI, W., 2004: Luft- und weltraumgestützte Messtechnologie – neue Perspektiven für die weltweite Gletscherbeobachtung. In: GAMERITH, W., MESSERLI, P., MEUSBURGER, P., & WANNER, H. (Hrsg.), Alpenwelt – Gebirgswelten. Inseln, Brücken, Grenzen. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen, 54. Deutscher Geographentag, Bern, 2003, 133-140.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2000: Detection and quantification of rock glacier deformation using ERS D-InSAR data. Proceedings of ERS-Envisat Symposium "Looking down to Earth in the New Millennium", Gothenburg, Sweden, SP-461, ESA Publications Division, 7 p.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2001: Estimation of Alpine Permafrost Surface Deformation Using InSAR Data. Proceedings of IGARSS 2001, Sydney, Australia, CD-ROM, 3 p.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2003a: Estimation of rock glacier surface deformation using SAR Interferometry Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41 (6), 1512-1515.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2003b: Measuring rock glacier surface deformation using SAR interferometry. In: PHILLIPS, M., SPRINGMAN, S.M., & ARENSON, L.U. (Eds.), Permafrost. Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, Vol. 1, Swets & Zeitlinger Publishers, 537-541.
- KWOK, R. & FAHNESTOCK, M.A., 1996: Ice sheet motion and topography from radar interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34 (1), 189-200.
- LIEB, G.K., 1996: Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. In: LEITNER, W. (Hrsg.), Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich. Arbeiten aus dem Institut f. Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz 33, 9-125.
- LIEB, G.K., KAUFMANN, V., KROBATH, M. & SULZER, W., 1999: Göbñitzkees und Hornkees - die Entwicklung zweier Kargletscher der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) seit dem Hochstand von 1850. Unpubl. Abschlussbericht im Rahmen eines Forschungsprojektes der Kärntner Nationalparkverwaltung, Institut für Geographie, Universität Graz, 76 S.
- MATTAR, K.E., VACHON, P.W., GEUDTNER, D., GRAY, A.L., CUMMING, I.G. & BRUGMAN, M., 1998: Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS Tandem-Mission SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (3), 974-984.
- NAGLER, T., MAYER, C. & ROTT, H., 2002a: Feasibility of DINSAR for mapping complex motion fields of alpine Ice- and Rock glaciers. Proceedings of 3rd Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield, U.K., ESA-SP475, 377-382.
- NAGLER, T., ROTT, H. & KAMELGER, A., 2002b: Analysis of Landslides in Alpine Areas by Means of SAR Interferometry. Proceedings of IGARRS 2002, Toronto, Canada, CD-ROM, 3 p.
- PATERSON, W.S.B., 1994: The Physics of Glacier. Pergamon Press, Oxford, 480 p.
- RACK, W., NIXDORF, U., MILLER, H. & RUNGE, H., 2004: Improved monitoring of polar land ice dynamics by means of SAR interferometry. Proceedings of 4th Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 410-416.
- RIGNOT, E., JEZEK, K.C. & SOHN, H.G., 1995: Ice Flow Dynamics of the Greenland Ice Sheet from SAR Interferometry. Geophysical Research Letters, 22 (5), 575-578.
- RIGNOT, E., 1997: ERS Interferometry Studies of Antarctic Ice Shelves. Proceedings of 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, ESA SP-414.
- ROCCA, F., PRATI, C. & FERRETTI, A., 1997: An Overview of ERS-SAR Interferometry. Proceedings 3rd Symp. on Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, ESA SP-414, Vol. 1, 27-36.
- RIGNOT, E., HALLET, B. & FOUNTAIN, A., 2002: Rock glacier surface motion in Beacon Valley, Antarctica, from synthetic-aperture radar interferometry. Geophysical Research Letters 29 (12), 10.1029/2001GL013494, 2002, 4 p.
- ROTT, H., NAGLER, T., ROCCA, A., PRATI, C., MAZZOTTI, A., KEUSEN, H., LIENER, S. & TARCHI, T., 2003: InSAR techniques and applications for monitoring landslides and subsidence. In: BENES (ed.), Geoinformation for European-wide Integration, Millpress, Rotterdam, 15-31.

- ROTT, H., & SIEGEL, A., 1997: Glaciological studies in the Alps and in Antarctica using ERS interferometric SAR. Proceedings of the Fringe 96 Workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, ESA SP-406, Vol. 2, 149-159.
- ROTT, H., STUEFER, M., SIEGEL, A., SKVARCA, P. & ECKSTALLER, A., 1998: Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield. Geophysical Research Letters 25 (9), 1407-1410.
- ROTT, H., & SIEGEL, A., 1999: Analysis of mass movements in alpine terrain by means of SAR interferometry. Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, 1933-1936.
- SCHNEIDER, B. & SCHNEIDER, H., 2001: Zur 60jährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Äußeren Hohebenkar, Öztaler Alpen, Tirol. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 37(1), 1-33.
- SHAROV, A.I. & ETZOLD, S., 2004: Full-value mapping of glacier rheology using repeat pass SAR interferometry. Proceedings of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy, ESA SP-550, CD-ROM, 7 p.
- STROZZI, T., WEGMÜLLER, U., WERNER, CH. & WIESMANN, A., 2002: Alpine Landslide Periodical Survey. Proceedings of IGARSS 2002, Toronto, Canada, CD-ROM, 3 p.
- STROZZI, T., WEGMÜLLER, U., KÄÄB, A. & FRAUENFELDER, R., 2003a: Satellite radar interferometry for detecting and quantifying mountain permafrost creep. Extended Abstracts on Current Research and Newly Available Information, 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, 155-156.
- STROZZI, T., KÄÄB, A., FRAUENFELDER, R. & WEGMÜLLER, U., 2003b: Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. Proceedings of IGARSS 2003, Toulouse, France, CD-ROM, 3 p.
- STROZZI, T., WEGMÜLLER, U., KÄÄB, A., FRAUENFELDER, WERNER, CH., GRAF, K., RÄTZO, H. & LATELTIN, O., 2003c: Differential interferometric applications in Alpine regions. Proceedings of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy, ESA SP-550, CD-ROM, 6 p.
- STROZZI, T., GUDMUNDSSON, G.H. & WEGMÜLLER, U., 2003d: Estimation of the surface displacement of Swiss Alpine glaciers using satellite radar interferometry. EARSeL eProceedings, Vol. 2, No. 1, 2003, ISSN 1729-3782, BIS-Verlag (<http://las.physik.uni-oldenburg.de/eProceedings/>), 5 p.
- STROZZI, T., KÄÄB, A. & FRAUENFELDER, R., 2004: Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. International Journal of Remote Sensing 25 (15), 2919-2931.
- VISCHER, D. (Hrsg.), 1997: Gletscherschwankungen im Alpenraum. Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 149, ETH Zürich, 84 S.
- WANG, Z. & LI, S., 1999: Detection of Winter Heaving of the Active Layer of Arctic Permafrost Using SAR Differential Interferograms. Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, 1946-1948.

Web-links

- RIGNOT, E., HALLET, B. & FOUNTAIN, A., 2005: Rock Glacier Surface Motion in Beacon Valley, Antarctica, from Synthetic-Aperture Radar Interferometry. <http://www.ess.washington.edu/qrc/beacon.html> (Zugriff am 28.5.2005).
- GAMMA, 2005: GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG. Homepage, <http://www.gamma-rs.ch> (Zugriff am 28.5.2005).

Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck: <http://dude.uibk.ac.at/>
 Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Graz: <http://www.joanneum.at/>
 Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, TU Graz: <http://www.geoimaging.tugraz.at/>
 Environmental Earth Observation Information Technology GmbH, Innsbruck: <http://www.enveo.at/>

4. Bewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel des Döneser Blockgletschers (Ankogelgruppe, Hohe Tauern, Kärnten)

L.W. KENYI und V. KAUFMANN

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz³ wird die Detektion und messtechnische Erfassung der Bewegung (Oberflächendeformation) des Döneser Blockgletschers (Ankogelgruppe, Hohe Tauern, Kärnten) mittels satellitengestützter (ERS-1/2) differentieller SAR-Interferometrie (DINSAR) vorgestellt. Für einen 35-tägigen Beobachtungszeitraum im Sommer 1992 konnte eine mittlere Bewegung von -6 mm in Radar-Aufnahmerichtung gemessen werden. Die größten Bewegungsraten von bis zu -18 mm/35 Tage wurden im oberen Teil des Blockgletschers festgestellt, am unteren Ende der Blockgletscherzunge wurden -10 mm/35 Tage gemessen. Die an der Blockgletscheroberfläche gemessenen Bewegungen (Deformationen) sind stetig und zeigen einen glatten Verlauf. Daraus kann abgeleitet werden, dass das im Inneren des Blockgletschers befindliche Eis als kraftübertragendes Medium fungiert.

4.1. Einleitung

Bei einem Radar mit synthetischer Apertur (= SAR, *Synthetic Aperture Radar*) werden in der Regel Amplitude (*amplitude*) und Phase (*phase*) des von der Erdoberfläche rückgestreuten Echos als Messgrößen aufgezeichnet. Die Phase eines einzelnen SAR-Bildes hat wenig Aussagekraft. Es wird daher i.a. das Amplituden- bzw. Intensitätsbild an den Endnutzer zur Verfügung gestellt. Es kann jedoch die Phasendifferenz von zwei rückgestreuten SAR-Echos, welche von ein und demselben Gebiet der Erdoberfläche stammen und unter geringfügig unterschiedlichen Satellitenpositionen aufgenommen wurden, zur Erzeugung eines digitalen Geländemodells (DGM) des „beleuchteten“ Geländestreifens ausgenutzt werden (KENYI & RAGGAM 1996, PRATI et al. 1992, ZEBKER et al. 1994a). Diese Technik wird SAR-Interferometrie (= *INSAR*, *SAR interferometry*) genannt und kann zur differentiellen SAR-Interferometrie (= *DINSAR*, *differential SAR interferometry*) für die Messung von kleinen im cm-Bereich liegenden Oberflächenbewegungen (-veränderungen) erweitert werden (GABRIEL et al. 1989).

Obwohl man mit der DINSAR-Methode schon erfolgreich durch Erdbeben (MASSONET et al. 1993) und durch Massenbewegungen im alpinen und arktischen Raum (ROTT & SIEGEL 1999, WANG & LI 1999) verursachte Geländebewegungen in SAR-Geometrie – die Veränderungen beziehen sich immer auf die SAR-Blickrichtung (*radar line of sight*) – messen konnte, müssen noch zusätzliche Untersuchungen für Anwendungen im gebirgigen Gelände durchgeführt werden. Insbesondere müssen Fragen zur Wechselwirkung der Radarstrahlung mit der Blockgletscheroberfläche – Blockgletscher sind Kriechphänomene des diskontinuierlichen Gebirgsperrmafrosts (BARSCH 1996) – und zur SAR-Sensorgeometrie beantwortet werden. Im speziellen geht es um die vergleichsweise kleine Größe der alpinen Blockgletscher in Bezug auf die SAR-Bodenauflösung, die meist raue Oberflächentopographie, das Vorhandensein von Altschneeflächen (perennierenden Schneefeldern), die langsamen, im Bereich von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern pro Jahr liegenden Fließgeschwindigkeiten, den Blickwinkel der SAR-Antenne auf die Erdoberfläche und die geometrischen sowie zeitlichen Aufnahmebedingungen (*geometric and temporal baseline requirements*) für geeignete DINSAR-Datensätze.

In diesem Aufsatz wird von der Erkennung (Detektion) der Bewegung eines aktiven, d.h. kriechenden Blockgletschers und der Quantifizierung der beobachteten Oberflächenbewegung unter Verwendung der DINSAR-Methode berichtet. Im Abschnitt 4.2 werden die theoretischen Grundlagen von DINSAR kurz zusammengefasst. Eine Beschreibung des Testgebietes und der in dieser Studie verwendeten SAR-Bilddaten, sowie eine interferometrische Prozessierungskette zur Erzeugung einer Oberflächenbewegungs-Karte sind Gegenstand des Abschnittes 4.3. Im Abschnitt 4.4 werden die erzielten Ergebnisse zahlenmäßig präsentiert und einer kritischen Diskussion unterzogen. Eine Zusammenfassung im Abschnitt 4.5 bildet den Abschluss.

³ Originalbeitrag ist in englischer Sprache verfasst und in LADO, L.W. & KAUFMANN, V., 2003: Estimation of Rock Glacier Surface Deformation Using SAR Interferometry Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (6), 1512-1515 publiziert. Eine Kurzversion dieses Beitrages wurde erstmals im Rahmen von *IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium* in Sydney, Australien, präsentiert (KENYI & KAUFMANN 2001).

4.2. Differentielle SAR-Interferometrie (DINSAR)

Durch Differenzbildung von zwei Interferogrammen können kleine Oberflächenbewegungen in der Größenordnung von Zentimetern über sehr große Flächen festgestellt und auch zahlenmäßig belegt werden (GABRIEL et al. 1989). Die gemessene INSAR-Phase ist einerseits von der Topographie des Geländes und andererseits von der nur in SAR-Blickrichtung wirkenden kohärenten, zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten erfolgten Verschiebung des Geländes abhängig. Die Grundidee der DINSAR-Technik liegt darin, die durch die Topographie verursachte Phase vom Gesamtanteil der Phase abzuspalten, um so den durch die Bewegung induzierten Phasenanteil zu erhalten. Bei der praktischen Durchführung müssen Rauschen und vom Ausbreitungsweg abhängige Phasenanteile berücksichtigt werden. Nähere Hinweise zur DINSAR-Technik können der Literatur (GABRIEL et al. 1989, MASSONET et al. 1993, ZEBKER et al. 1994b,) entnommen werden.

Die gemessene Phasendifferenz ϕ eines Zwei-Pass-Interferometers (*repeat orbit INSAR system*) kann gemäß (1) (vgl. ZEBKER et al. 1994b) durch

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (1)$$

dargestellt werden, wobei Δr die Differenz der entsprechenden Schrägentfernungen (*slant ranges*) ist. Die beobachtete Phasendifferenz setzt sich i.a. aus den in (2) angeführten Anteilen zusammen (vgl. WEGMUELLER & STROZZI 1998):

$$\phi = \phi_{\text{Topographie}} + \phi_{\text{Bewegung}} + \phi_{\text{Rauschen}} + \phi_{\text{Atmosphäre}} + \phi_{\text{Prozessierung}} \quad (2)$$

Um den Phasenanteil der Verschiebung (= Bewegungskomponente in SAR-Blickrichtung) zu erhalten, müssen gemäß Gleichung (2) alle anderen Phasenanteile eliminiert werden.

- Der Rauschanteil der Phase setzt sich aus drei Komponenten zusammen, nämlich dem thermischen Rauschen des Radarsystems, der Basislinien-Dekorrelation (zufolge unterschiedlicher Beobachtungs-Positionen der Aufnahmen) und der zeitlichen Dekorrelation (= Veränderung der Rückstreuungseigenschaften der Objekte zwischen den Aufnahmen). Das thermische Rauschen kann vernachlässigt werden, da das Signal/Rausch-Verhältnis SNR der beiden ERS (*European Remote Sensing Satellite*)-Sensoren bereits maximal ist. Die Basislinien-Dekorrelation kann durch geeignete Filterung (*spectral shift filtering*) reduziert werden und zwar bei einer orthogonalen Basislinienkomponente größer als der für ERS optimale Wert (200 m). Bei der Szenendekorrelation ist der Zwei-Pass-Interferometrie inhärent und kann durch die Auswahl geeigneter Bildpaare mit kleiner Zeit-Basis (*temporal baseline*) minimiert werden.
- Rauschen zufolge Fehler der Datenprozessierung kann als Rauschen in den Daten interpretiert werden.
- Phasenfehler zufolge unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen der beiden Aufnahmen können im gegenständlichen Anwendungsbeispiel (Dösjener Blockgletscher) vernachlässigt werden, da die Größe des Untersuchungsgebietes kleiner ist als die durchschnittliche räumliche Ausdehnung von troposphärischen Veränderungen. Den größten Einflussfaktor auf die beobachtete Phasendifferenz stellt die Topographie (*topography*) des Geländes dar. Die interferometrische Phase des Geländes kann entweder über ein digitales Geländemodell oder durch ein weiteres Interferogramm mit einer relativ großen orthogonalen (normalen) Basislinie geschätzt werden.

Nach der Elimination der unerwünschten Phasenanteile kann die verbleibende Phase als Auswirkung einer Verschiebung/Bewegung der Geländeoberfläche betrachtet werden und gemäß (3) (vgl. ZEBKER et al. 1994b) dargestellt werden:

$$\phi_{\text{Bewegung}} = \frac{4\pi}{\lambda} \rho \quad (3)$$

Für den ERS SAR-Sensor (ERS-1/2 sind typengleich) gilt, dass ein Phasenzyklus von 2π einer Verschiebung der Geländeoberfläche (= kohärente Phasenzentrum) von 28,3 mm in SAR-Schrägdistanzdarstellung entspricht.

4.3. Daten und interferometrische Prozessierungskette

4.3.1. Testgebiet und Daten

Der Dösener Blockgletscher⁴ (46°59' N, 13°17' E) liegt im Talschluss des Dösener Tales (Ankogelgruppe, Hohe Tauern, Kärnten). Das glazial überprägte, WE orientierte, innere Dösener Tal überdeckt ein Gebiet von ca. 3 km² Größe und überstreicht einen Höhenbereich zwischen 2000 m und 3086 m (siehe Abb. 7). Es besteht aus kristallinen Gesteinen, vorzugsweise aus granitischem Gneis. Das Gelände wird durch eine mannigfaltige glaziale und periglaziale Morphologie geprägt, u.a. auch durch zahlreiche Hangschuttstrukturen, welche größtenteils durch Permafrostprozesse entstanden sind. Das Zentrum des Testgebietes wird vom Dösener Blockgletscher eingenommen. Dieser hat eine Länge von ca. 900 m und eine Fläche von ca. 0,4 km². Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt -2 °C in 2550 m Höhe, der jährliche Niederschlag liegt bei 2000 mm in derselben Höhe. Somit können Gebiete mit und ohne Permafrost studiert werden. Die meisten Teile des Studiengebietes sind frei von einer kompakten Vegetationsdecke. Im Blockschutt am Fuße der nordorientierten Hänge, dazu gehört auch der Dösener Blockgletscher, reicht der Permafrost hinab bis zu einer Höhe von ca. 2270 m. Das Zungenende des Blockgletschers liegt auf 2350 m (vgl. beiliegende Karte). Aufgrund von geophysikalischen Messungen (seismische und elektromagnetische Messungen, Bodenradar) kann die Dicke des Blockgletschers mit ca. 30-40 m angegeben werden. Das Volumen des Blockgletschers kann mit 15×10^6 m³ abgeschätzt werden.

Detaillierte Hinweise über Gebirgspermafrost in den Österreichischen Alpen und im speziellen auch über den Dösener Blockgletscher können LIEB 1998 entnommen werden. Seit 1995 werden zur Erfassung der raumzeitlichen Veränderung der Oberfläche des Dösener Blockgletschers geodätische und auch photogrammetrische Messungen durchgeführt. Im unteren zentralen Teil des Blockgletschers wurde eine maximale horizontale Fließgeschwindigkeit von ca. 30 cm/Jahr festgestellt (KAUFMANN 1998).

Für die INSAR-Prozessierung wurden 5 ERS-1/2 *Single-Look Complex* (SLC)-Bild Datensätze, welche im Zeitraum 1992-1997 über dem Gebirgsraum der Hohen Tauern aufgenommen wurden, angekauft⁵. Bei der Auswahl der Bilddatensätze wurde speziell auf die Wetterverhältnisse zum Zeitpunkt der Bildaufnahme Acht gegeben, um atmosphärische Einflüsse zu minimieren. Auf Grund der Erfahrungen in den vorangegangenen geodätischen Messkampagnen und den photogrammetrischen Luftbilddatenauswertungen wurden die schneefreien Monate August und September als bestmöglicher Beobachtungszeitraum ausgewählt. Perennierende Schneefelder können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Die Auswahl der interferometrischen Bildpaare richtete sich demnach nach diesem Zeitraum. Die Orbit-Bildpaare, Basislinienkomponenten und Aufnahmezeitintervalle (*temporal baselines*) der ausgewählten und auch prozessierten ERS-1/2 SAR-Szenen sind in Tab. 1 gelistet.

Orbit-Bildpaar	parallele Basiskomponente (m) (<i>parallel baseline</i>)	orthogonale Basiskomponente (m) (<i>normal baseline</i>)	Zeitunterschied (Tage) (<i>temporal baseline</i>)
05778 (23.8.1992) - 06279 (27.9.1992)	-46	-7	35
05778 (23.8.1992) - 21152 (1.8.1995)	131	261	1073
05778 (23.8.1992) - 31673 (5.8.1997)	-44	-450	1808
06279 (27.9.1992) - 21152 (1.8.1995)	177	265	1038
06279 (27.9.1992) - 31673 (5.8.1997)	2	-446	1773
21152 (1.8.1995) - 12000 (6.8.1997)	-144	-343	736
31673 (5.8.1997) - 12000 (6.8.1997)	35	376	1

Tab. 1: Verarbeitete ERS-1/2 *Single-Look Complex* (SLC)-Bilddaten.

⁴ Lage siehe beiliegende Luftbildkarte 1:10 000 „Inneres Dösener Tal, Ankogelgruppe“.

⁵ Die verbilligte Anschaffung der ERS-Bilddaten erfolgte im Rahmen von zwei ESA-Projekten.

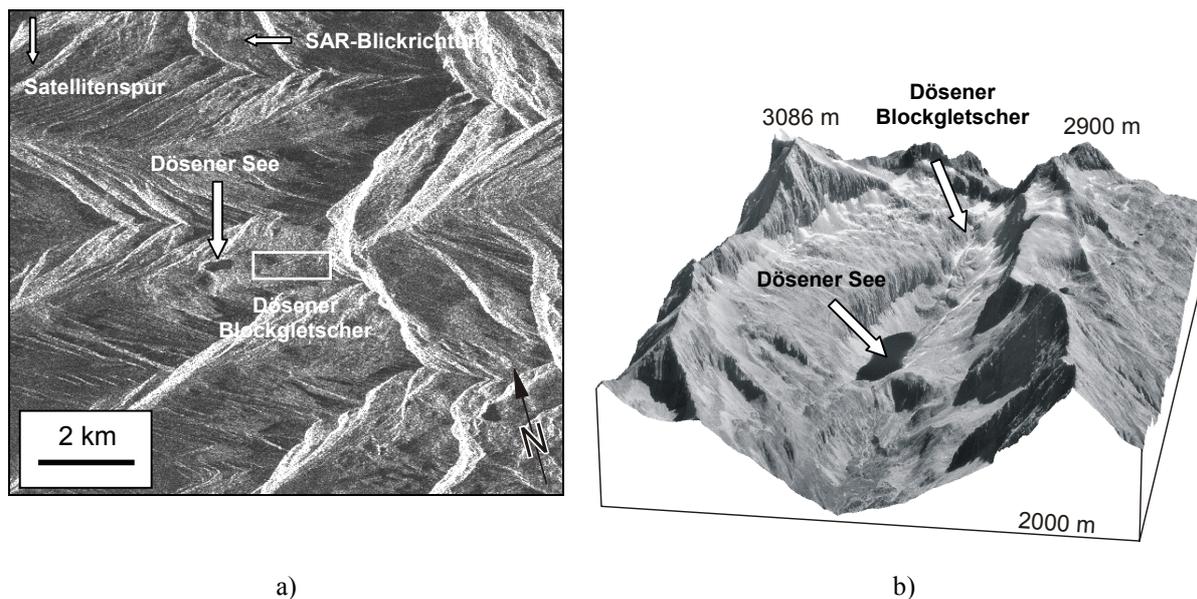


Abb. 7: a) Ausschnitt aus einem SAR-Amplitudenbild. Es zeigt das Testgebiet mit dem Dösender See und dem Dösender Blockgletscher. Die dargestellte Bildgeometrie entspricht der für Radarbilder typischen Schrägdistanzdarstellung. b) Perspektivische Darstellung des Testgebietes (Phototextur vom 17.9.1975).

4.3.2. Datenverarbeitung

Nach der Koregistrierung der SLC-Bildpaare wurden für alle in Tab. 1 angeführten Kombinationen interferometrische Produkte erstellt. Bei der anschließenden INSAR Multilook-Bildung wurde *five looks* gewählt, um das Phasenrauschen bzw. die Datenmenge zu reduzieren. Die Neuberechneten Bildelemente haben eine Bodenauflösung von $20 \times 20 \text{ m}^2$. Die räumliche Auflösung ist noch gut genug, um den Dösender Blockgletscher ausreichend aufzulösen. Die Bildpaare 05778-06279 und 31673-12000 zeigten die beste Kohärenz der SAR-Signale. Jedoch war die orthogonale Basislinie (*normal baseline*) des Bildpaares 31673-12000 mit ca. 376 m sehr groß, wodurch sich ein dominanter topographischer Phasenanteil ergibt. Im Gegensatz dazu ist die orthogonale Basiskomponente des Bildpaares 05778-06279 nur ca. 7 m – ein idealer Wert für DINSAR-Anwendungen. Da dieses Interferogramm nahezu eine Null-Basislinie aufweist, kann das vom Einfluss der „flachen Erde“ befreite Interferogramm direkt als Bewegungs-Phase interpretiert werden. Jedoch ist das Studiengebiet durch hohe Reliefenergie gekennzeichnet. Trotz der sehr kleinen Basislinie ist der Einfluss des Reliefs im „verebneten“ (*flattened*) Interferogramm deutlich zu erkennen. Diese Tatsache wurde durch Vergleich des „verebneten“ Interferogramms mit einem simulierten (*wrapped*) Interferogramm bestätigt (vgl. Abb. 9a and Abb. 9b).

Für die weitere Prozessierung wurde die Zwei-Pass-DINSAR-Methode (WEGMUELLER & STROZZI 1998) gewählt, da für das Studiengebiet ein genaues digitales Geländemodell zur Verfügung stand. Die Abschätzung der topographischen Phase aus dem ERS Tandem-Bildpaar 13673-12000 (1 Tag Zeitintervall) wurde nicht durchgeführt, da im *Phase Unwrapping*-Prozess Fehler zufolge des stark bewegten Geländes (Hangverkürzung/ *foreshortening*, Umkehrung/ *layover*) zu erwarten waren.

4.3.3. Simulation von Interferogrammen

Für die bildpunktweise Transformation des von der Phasenmehrdeutigkeit aufgelösten (*unwrapped*) INSAR-Interferogramms in den Objektraum stehen mehrere Möglichkeiten – basierend auf dem INSAR-Abbildungsmodell – zur Verfügung. In KENYI & RAGGAM 1996 wird ein Verfahren zur Transformation des *unwrapped* INSAR-Phasenbildes in Höhenwerte einer beliebigen Kartenprojektion beschrieben. Dieses Verfahren wurde dahingehend modifiziert, um Interferogramme aus einem in einer spezifischen Kartenprojektion vorliegenden DGM in Schrägentfernungs-Darstellung (*slant range geometry*) zu simulieren (vgl. Abb. 8).

Die Koregistrierung des simulierten Interferogramms mit jenem durch INSAR gemessenen erfolgte mit Pixel-Genauigkeit. Abb. 9 zeigt den Vergleich des mit ERS-1 SAR gemessenen Interferogramms mit dem entsprechenden simulierten Interferogramm. In weiterer Folge wurde nun das *unwrapped* simulierte Interferogramm benutzt, um den topographischen Phasenanteil aus dem Interferogramm des Bildpaares 05778-06279 zu entfernen. Die rechen-technische Umsetzung dieses Schrittes erfolgte in der komplexen Zahlenebene durch Multiplikation des konjugiert komplexen simulierten Interferogramms mit jenem durch INSAR gemessenen. Dieses Ergebnis wurde anschließend durch spektrale Filterung (*spectral filtering*) geglättet, um den Salz-und-Pfeffer-Effekt (= *Speckle*-Effekt) zu reduzieren (vgl. GOLDSTEIN & WERNER 1998). In einem weiteren Schritt wurden die Phasenmehrdeutigkeiten nach der *Brunch-Cut*-Methode (GOLDSTEIN et al. 1988) aufgelöst (= *unwrapping*). Abschließend wurde das *unwrapped* Interferogramm in ein Ergebnisbild mit cm-Werten umgerechnet und in Form einer thematischen Karte (= *radar line-of-sight displacement map*) dargestellt (vgl. Abb. 10b). Die ermittelten Bewegungsbeträge beziehen sich auf die SAR-Blickrichtung.

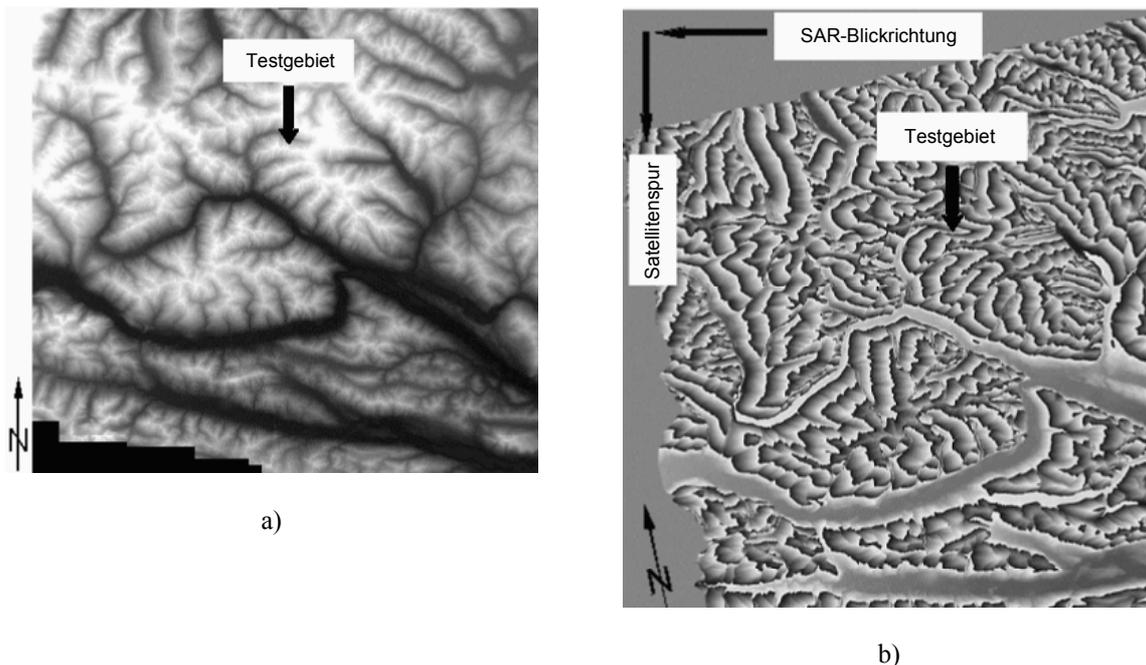


Abb. 8: a) Digitales Geländemodell für die Simulation der topographisch induzierten Phase. b) Simuliertes Interferogramm unter Verwendung der ERS-1 Abbildungsparameter der Orbits 05578 und 06279. Dargestellt ist das *wrapped* (modulo 2π) Interferogramm. Für die Elimination des topographischen Phasenanteils wurde jedoch das *unwrapped* (absolute) Interferogramm benutzt.

4.4. Quantitative Analyse

Die quantitative Analyse bezieht sich auf das in Abb. 10 mit einem Rahmen eingegrenzte Gebiet des Dösener Blockgletschers. Für eine Genauigkeitsanalyse wurden die interferometrisch ermittelten Bewegungsbeträge in den stabilen Gebieten rund um den Dösener Blockgletscher statistisch ausgewertet. Nach Abspaltung eines systematischen Anteils ergab sich ein RMSE von $\pm 1,4$ mm. Das Endergebnis der interferometrischen Prozessierungskette ist in Abb. 11 dargestellt und zeigt eine Karte der Bewegungen in Bodendistanz-Darstellung mit 1 mm-Isolinien. Gebiete mit einer statistisch nicht signifikanten Bewegung sind grau dargestellt. Als Schwellwert wurde der doppelte RMSE gewählt. Bei den übrigen interferometrischen Bildpaaren war die Kohärenz (*coherency*) im Bereich des Blockgletschers zu gering, um eine erfolgreiche interferometrische Prozessierung zu ermöglichen.

Abb. 11a zeigt sehr schön die Bewegung/Deformation des Dösener Blockgletschers in SAR-Geometrie. Die Prozesse, welche für die Bewegungsdynamik eines Blockgletschers verantwortlich zeichnen, sind der allgemeine Massentransport (z.B. Schuttfuhr), Kriechprozesse, Stauchung bzw. Dehnung und lokale Massenveränderungen durch Eisschmelze bzw. Eiszugewinn (KÄÄB et al. 2003). Es kann daher die

Fließgeschwindigkeit des Blockgletschers nicht ohne besondere Annahmen über die vorhin erwähnten Teilprozesse aus den DINSAR-Messungen abgeleitet werden.

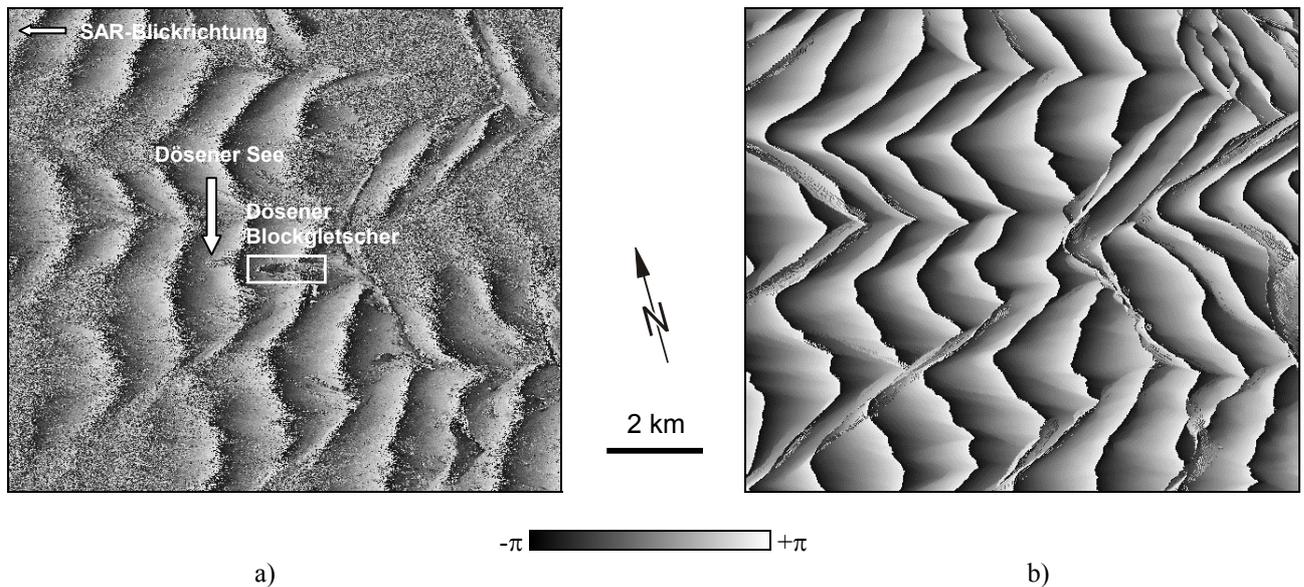


Abb. 9: Vergleich des a) mittels DINSAR berechneten Interferogramms mit dem b) mit Hilfe des digitalen Geländemodells simulierten Interferogramms. Beide Interferogramme sind 5-looks geglättet.

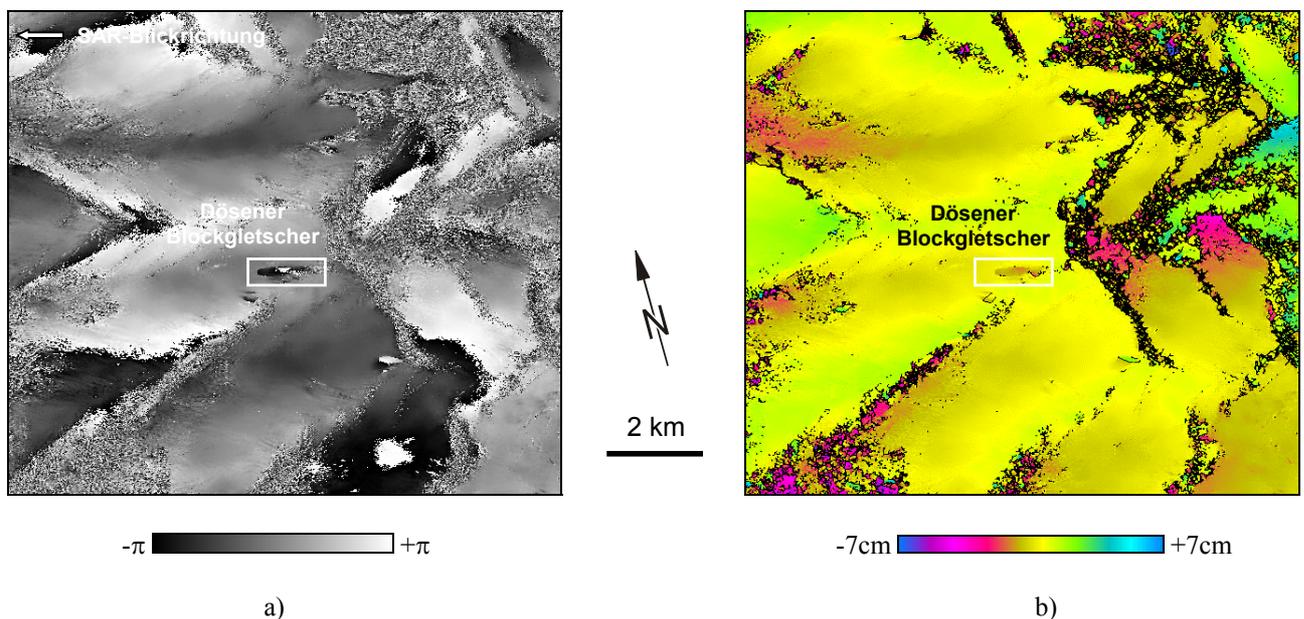


Abb. 10: Differenz-Interferogramm ermittelt durch Subtraktion des mit Hilfe des digitalen Geländemodells simulierten Interferogramms vom INSAR-Interferogramm des ERS-1 Bildpaares 05778-06279. a) *wrapped* Interferogramm, b) *unwrapped* Interferogramm umgerechnet in äquivalente Verschiebungswerte.

Die größte Bewegung (Punkt A in Abb. 11a) wurde mit ca. $-18 \text{ mm}/35 \text{ Tage}$ gemessen, im unteren Bereich (Punkt S in Abb. 11a) des Blockgletschers wurde ein Betrag von $-10 \text{ mm}/35 \text{ Tage}$ ermittelt. Als mittlerer Bewegungs-/Verschiebungsbetrag ergab sich ein Wert von ca. $-6 \text{ mm}/35 \text{ Tage}$. Der direkte Vergleich der erzielten Ergebnisse mit jenen der jährlichen geodätischen Messungen und auch mit jenen der photogrammetrischen Zeitreihen-Analyse (KAUFMANN 1998) ist nicht unmittelbar möglich, da die Vergleichsdaten verschiedene Beobachtungszeiträume überstreichen und auch geometrisch unterschiedlich sind.

Das durch DINSAR festgestellte Bewegungsmuster ist glatt und steht in Einklang mit dem auf photogrammetrischem Wege bestimmten horizontalen Fließgeschwindigkeitsbild (vgl. Abb. 11a mit Abb. 11b). Die durch differentielle SAR-Interferometrie gewonnenen Bewegungs-/Deformationswerte müssen – wie schon vorhin erwähnt – den einzelnen für die Dynamik des Blockgletschers relevanten Prozessen zugeordnet werden. Derzeit besteht jedoch noch immer ein beträchtliches Wissensdefizit bezüglich Blockgletscherdynamik. Aus diesem Grund hat die International Permafrost Association (IPA) eine Arbeitsgruppe (*Task Force on Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics*) eingerichtet, um den gegenwärtigen (2002) Wissensstand in der numerischen Modellierung des Fließens und der Entstehung von dauernd gefrorenen Eis-Schutt-Gemischen zu erarbeiten.

Für eine bestmögliche geometrische Deutung der durch DINSAR gemessenen Verschiebungsbeträge wären im gegenständlichen Fall weitere SAR-Interferogramme von komplementären Orbits (= *ascending orbits*) notwendig. Da jedoch die Orientierung des Blockgletschers in Bezug auf die SAR-Blickrichtung – wegen des Einflusses des Geländereiefs auf die SAR-Geometrie – eine entscheidende Rolle spielt, ist dieser Forderung i.a. schwer Rechnung zu tragen. Um optimale Ergebnisse aus den Interferogrammen ableiten zu können, sollte i.a. der zu untersuchende Blockgletscher in einem dem SAR-Sensor abgewandten Hang (*back slope*) liegen und seine Hauptfließrichtung sollte weiters parallel zur SAR-Blickrichtung sein, d.h., es können i.a. entweder nur aufsteigende (*ascending*) oder absteigende (*descending*) Orbits bei einer Auswertung berücksichtigt werden.

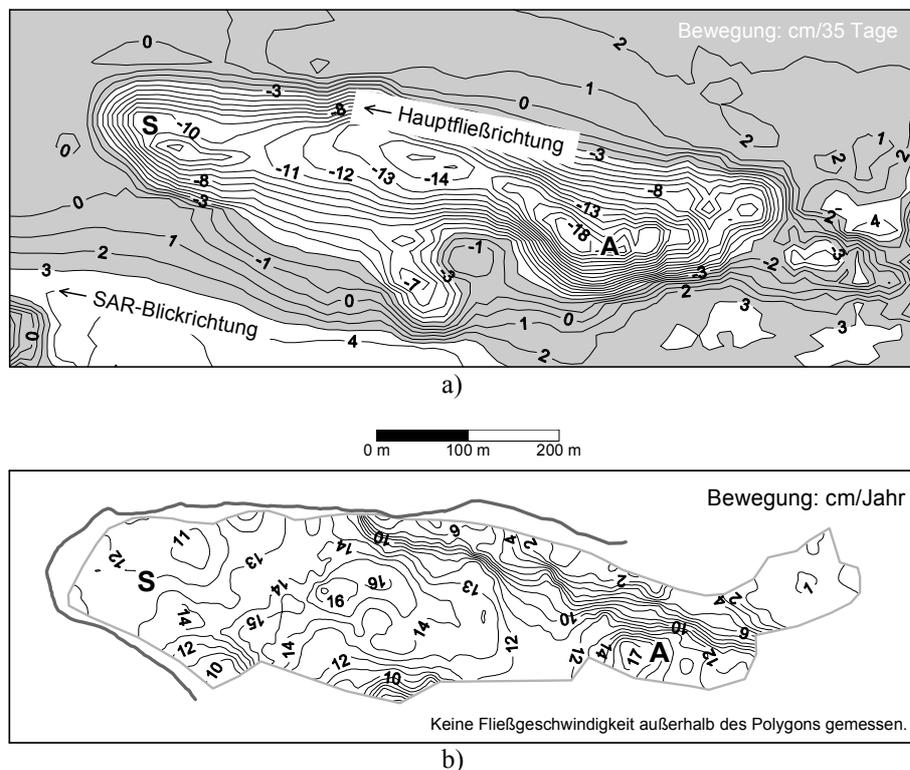


Abb. 11: a) Isolinien-Darstellung (1 mm-Intervall) der mittels DINSAR berechneten Bewegung des Dösender Blockgletschers für einen 35-tägigen Beobachtungszeitraum im Sommer 1992. Nicht signifikante Bewegung ist grau dargestellt. b) Photogrammetrisch bestimmte mittlere jährliche Horizontalbewegung des Dösender Blockgletschers für den Zeitraum 1975-1993. Isoliniendarstellung mit 1 cm-Intervall.

4.5. Schlussfolgerung

In diesem Aufsatz konnte die erfolgreiche Detektion und Messung der Bewegung/Deformation eines aktiven Blockgletschers mittels ERS DINSAR-Daten präsentiert werden. Die mittlere Bewegungsrate des untersuchten Dösender Blockgletschers wurde mit $-6 \text{ mm}/35 \text{ Tage}$ (in SAR-Blickrichtung) bestimmt. Aufgrund der Komplexität der Bewegungsdynamik können die Ursachen der gemessenen Verschiebung – sei es allgemeiner Massentransport, Weiterbewegung des Permafrostkörpers durch Kriechen, Dehn- bzw. Stauchungseffekte, lokale Massenänderung durch Eisschmelze bzw. -zugewinn – nicht geklärt werden.

Für die erfolgreiche Detektion und Messung von Blockgletscherbewegung in alpinen Räumen werden ERS-1/2 INSAR-Daten mit sehr kleiner effektiver Basislänge benötigt. Eine Multilook-Bildung (z.B. 5 looks) ist notwendig. Der Blockgletscher muss im sog. *back slope* (= Geländehang, der dem SAR-Sensor abgewandt ist) liegen, da sonst *Layover* eine Auswertung unmöglich machen würde. Die Hauptfließrichtung des Blockgletschers sollte möglichst parallel zur SAR-Blickrichtung sein. Die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Aufnahmen der interferometrischen Bildpaare sollte möglichst klein sein und die Aufnahmen sollten im Zeitraum August-September erfolgen, da zu dieser Zeit das Gelände mit großer Wahrscheinlichkeit schneefrei ist, ansonsten muss mit stark reduzierter Szenenkohärenz gerechnet werden.

4.6. Literatur

- BARSCH, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer Series in Physical Environment 16, Springer Verlag, 335 S.
- GABRIEL, A.K., GOLDSTEIN, R.M. & ZEBKER, H.A., 1989: Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research* 94 (B7), 9183-9191.
- GOLDSTEIN, R.M., ZEBKER, H.A. & WERNER, C.L., 1988: Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* 23 (4), 713-720.
- GOLDSTEIN, R.M. & WERNER, C.L., 1998: Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* 25 (21), 4035-4038.
- KÄÄB, A., KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R. & EIKEN, T., 2003: Rock glacier dynamics: Implications from high-resolution measurements of surface velocity fields. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, Vol. 1*, 501-506.
- KAUFMANN, V., 1998: Deformation analysis of the Doesen rock glacier (Austria). *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Permafrost, Yellowknife, Canada*, 551-556.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2001: Estimation of Alpine Permafrost Surface Deformation Using InSAR Data. *Proceedings of IGARSS 2001, Sydney, Australia, CD-ROM*, 3 pages.
- KENYI, L.W. & RAGGAM, H., 1996: Accuracy assessment of interferometrically derived DTMs. *Proceedings of ESA FRINGE '96 Workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, Switzerland*, 51-56.
- LIEB, G.K., 1998: High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Permafrost, Yellowknife, Canada*, 663-668.
- MASSONET, D., ROSSI, M., CARMONA, C., ADRAGNA, F., PELTZER, G., FEIGL, K. & RABAUTE, T., 1993: The displacement field of Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* 364, 138-142.
- PRATI, C., ROCCA, F. & MONTI-GUARNIERI, A., 1992: SAR interferometry experiments with ERS-1. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France*, 211-218.
- ROTT, H. & SIEGEL, A., 1999: Analysis of Mass Movements in Alpine Terrain by Means of SAR Interferometry. *Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, 1933-1936*.
- WANG, Z. & LI, S., 1999: Detection of winter frost heaving of the active layer of Arctic permafrost using SAR differential interferograms. *Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, 1946-1948*.
- WEGMUELLER, U. & STROZZI, T., 1998: Characterization of differential interferometry approaches. *Proceedings of EUSAR 1998, Friedrichshafen, Germany*, 237-240.
- ZEBKER, H.A., WERNER, C., ROSEN, P.A. & HENSLEY, S., 1994a: Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (4), 823-836.
- ZEBKER, H.A., ROSEN, P.A., GOLDSTEIN, R.M., GABRIEL, A. & WERNER, C.L., 1994b: On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99 (B10), 19617-19634.

5. Detektion von aktiven Blockgletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Hohe Tauern, Kärnten)

L.W. KENYI und V. KAUFMANN

Zusammenfassung

Im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes standen insgesamt 15 in den schneefreien Sommer- und frühen Herbstmonaten 1995-2001 über der Schobergruppe (Hohe Tauern, Zentralalpen, Österreich) aufgenommene SAR-Szenen der beiden europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1/2 für eine interferometrische Bildanalyse zur Verfügung. Die interferometrische Prozessierung beschränkte sich auf jene fünf SAR-Bildpaare mit möglichst kleiner effektiver Basislinie (*normal baseline*). Das Zeitintervall zwischen den beiden Aufnahmen der jeweiligen Bildpaare betrug entweder einen Tag (ERS-1/2 Tandem-Mission) oder fast ein Jahr (315 bzw. 350 Tage). Die Aufgabenstellung⁶ bestand darin, Oberflächendehformationen bzw. -bewegungen in der Schobergruppe bzw. angrenzenden Gebieten mittels differentieller SAR-Interferometrie (DINSAR) zu detektieren. Mit den vorliegenden SAR-Bilddaten konnte jedoch die erhoffte Detektion von kleinsten Oberflächenveränderungen – insbesondere die Erfassung der Bewegung des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar (Gössnitztal) – nicht erfolgreich realisiert werden. Die Gründe hierfür sind zweifacher Art:

(1) Die „eintägigen“ Interferogramme der Tandem-Mission können die Kinematik des Blockgletschers Hinteres Langtalkar, aber auch jene aller anderen Blockgletscher, welche mittlere jährliche Bewegungsraten im Zentimeter- bis Meterbereich aufweisen, nicht nachweisen, da das Signifikanzniveau der DINSAR-Analyse bei Einzelauswertungen von ERS-Bildpaaren i.a. bei ca. ± 7 mm Verschiebung des kohärenten Phasenzentrums in SAR-Blickrichtung (*radar line-of-sight*) liegt. Dies entspräche einer horizontalen Gesamtjahresbewegung von ca. 6,6 m (bei ebenem Gelände).

(2) Bei einem Zeitraum von nahezu einem Jahr zwischen den einzelnen SAR-Aufnahmen wird trotz sonstiger optimaler Bedingungen (Trockenheit, keine Schneefelder, keine atmosphärischen Störungen) auch bei Blockgletschern keine ausreichende Szenenkohärenz mehr gegeben sein. Die Kohärenz der SAR-Signale wird durch die differentielle Bewegung der Felsblöcke der Blockgletscheroberfläche empfindlich gestört. Dies gilt im besonderen Maße auch für den aktiven Blockgletscher Hinteres Langtalkar, dessen Oberfläche sich im unteren Zungenbereich durch Massenbewegungen ständig verändert. Da die ERS-Satelliten die Erdoberfläche mit einer zeitlichen Wiederholungsrate von 35 Tagen aufnehmen bzw. aufgenommen haben, wären 35, 70 oder eventuell 105 Tage Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen – im Sinne der Aufgabenstellung – optimal gewesen (vgl. dazu den Beitrag über den Dösener Blockgletscher in diesem Bericht). Dies war jedoch beim gegebenen Datenpool von 15 Aufnahmen und zufolge der Basislinienrestriktion für DINSAR nicht möglich.

5.1. Einleitung

Die Schobergruppe (400 km²) ist ein im S der Glocknergruppe gelegener, wenig vergletscherter und bis jetzt noch mäßig erschlossener Hochgebirgsstock in den Hohen Tauern. Zahlreiche Berggipfel (ca. 50) sind über 3000 m hoch. Die höchsten Gipfel sind Petzeck (3283 m), Roter Knopf (3281 m) und Hochschober (3242 m). Über Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe gibt LIEB 1987 Auskunft. BUCHENAUER 1990 fasste die Gletscher- und Blockgletschergeschichte der westlichen Schobergruppe (Osttirol) zusammen. Der zentrale Bereich der Schobergruppe gehört zur Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern (vgl. Abb. 12).

Bei der praktischen Durchführung der SAR-Bildanalyse wurde das Arbeitsgebiet räumlich auf das zur Gänze im Kärntner Teil des Nationalparks Hohe Tauern liegende Gössnitztal eingeschränkt (vgl. Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14). Dies liegt u.a. darin begründet, dass der Projektleiter schon über viele Jahre hinweg – gemeinsam mit G.K. Lieb vom Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz – Forschungsprojekte in diesem Gebiet durchgeführt hat. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten standen und stehen noch immer das Gössnitzkees und der Blockgletscher im Hinteren Langtalkar (Lage siehe Abb. 12 und Abb. 14). Geodätische und permafrostkundliche Studien wurden auch am Weißenkar Blockgletscher durchgeführt (Lage siehe Abb. 12).

G.K. Lieb und V. Kaufmann haben bereits im Jahre 1982 mit jährlichen Gletschermessungen am Gössnitz- und Hornkees im Rahmen des ÖAV-Gletschermessdienstes begonnen (LIEB & KAUFMANN 1985). Im Jahre 1999 wurde ein Forschungsprojekt (Leitung: G.K. Lieb) des Kärntner Nationalparkfonds mit dem Titel „Gössnitz-

⁶ Vgl. dazu auch Kap. 8.

und Hornkees – Die Entwicklung zweier Kargletscher der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) seit dem Hochstand von 1850“ abgeschlossen (LIEB et al. 1999). Weitere wissenschaftliche Ergebnisse aus dem vorhin genannten Projekt sind in KAUFMANN & PLÖSCH 2000 bzw. LIEB 2000 publiziert. Geodätische Messungen zu genauen Erfassung des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees starteten im Jahre 1996 (KIENAST & KAUFMANN 2004). Terrestrisches Laserscanning und auch terrestrische Photogrammetrie wurden am Gössnitzkees aus methodischer Sicht auf ihre Anwendbarkeit für glaziologische Fragestellungen hin untersucht (BAUER et al. 2003, KAUFMANN & LADSTÄDTER 2004). Jüngste Arbeiten haben sich mit dem Blockgletscher im Hinteren Langtalkar beschäftigt (AVIAN et al. 2005, vgl. dazu auch Kap. 6 und Kap. 7 in diesem Bericht).

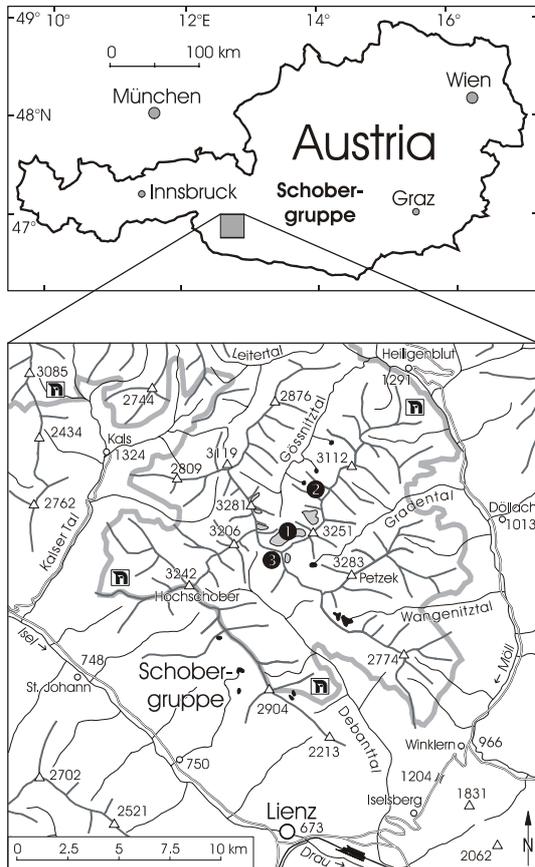


Abb. 12: Lage von ❶ Gössnitzkees, ❷ Blockgletscher Hinteres Langtalkar und ❸ Weissenkar Blockgletscher in der Schobergruppe. Wesentliche Teile der Schobergruppe liegen im Nationalpark Hohe Tauern (▣).

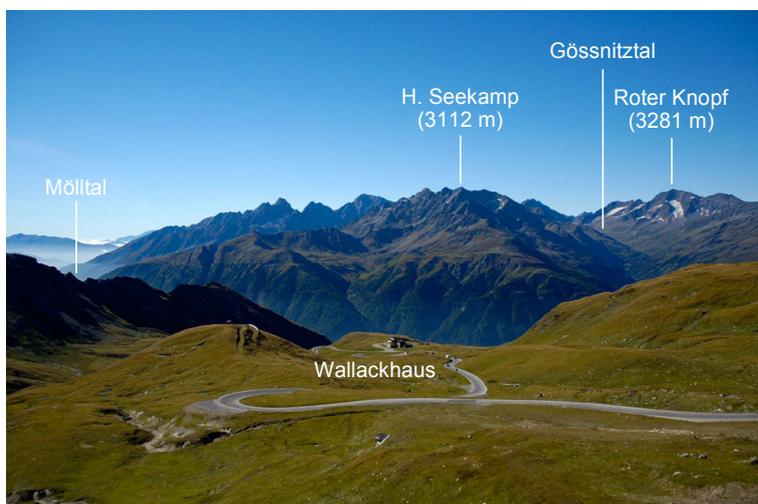


Abb. 13: Blick vom Hochtor (Großglockner-Hochalpenstraße) in südlicher Richtung in die Schobergruppe. Das Gösstnitztal ist rechts im Bild zu sehen. Der markante Berggipfel mit dem kleinen Wandnischengletscher ist der Rote Knopf (3281 m). Quelle: <http://www.astro.univie.ac.at/~exgalak/koprolin/Obs/Glockner04/>.

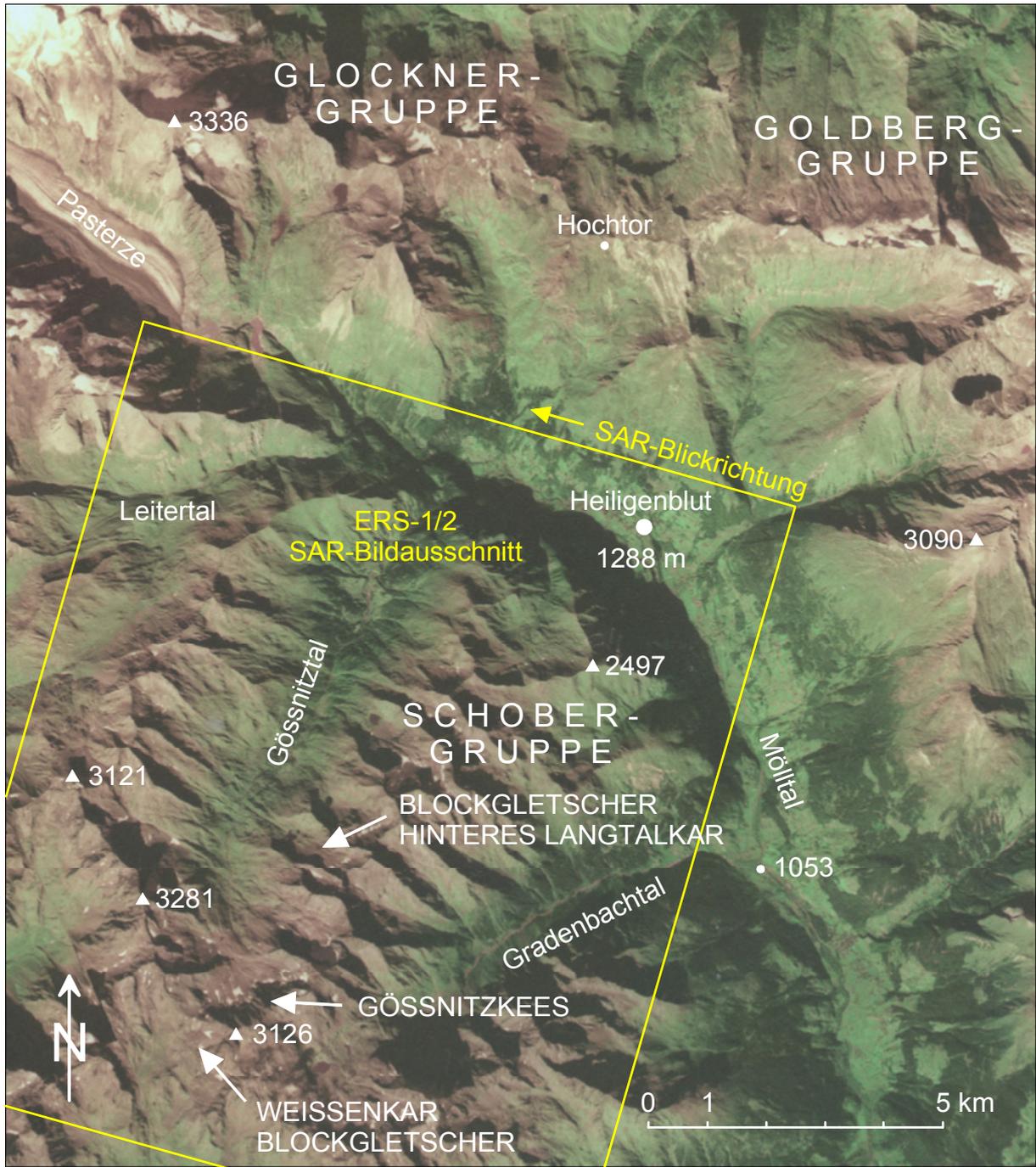


Abb. 14: Gösnitztal (Schobergruppe) und Pasterze (Glocknergruppe) im russischen KFA-1000-Satellitenbild. Die Aufnahme (Zweischichtfilm) erfolgte am 25.9.1991 im Rahmen des AUSTROMIR-Projekts von der Station MIR aus. Mit einem gelben Rahmen ist das Studiengebiet für die SAR-Bildanalyse dargestellt (vgl. dazu die Abb. 15). Die Bilddaten wurden vom Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen der TU Graz durch Dipl.-Ing. R. KALLIANY zur Verfügung gestellt.

5.2. ERS-1/2-Bilddaten

Im Jahre 2001 wurde bei der ESA (*European Space Agency*) ein „*Category-1*“-Projekt mit dem Titel „Revealing rock glacier movement using ERS D-InSAR data“ zur Genehmigung vorgelegt. Der Projektvorschlag wurde von den Gutachtern positiv bewertet und angenommen. Mit der Projektgenehmigung war der Bezug von maximal 20 ERS-SAR-Szenen zum Selbstkostenpreis (*cost of reproduction*) verbunden. Diese kostengünstige Ankaufsmöglichkeit wurde im Rahmen des gegenständlichen Projekts ausgenutzt, indem 15 ERS-SAR-Szenen, welche die Schobergruppe abdecken und gleichzeitig den interferometrischen Bedürfnissen entsprechen, angekauft. Aus Kostengründen wurden neben ausgewählten SAR-Vollszenen (*SLC-I*) auch einige SAR-Viertelszenen (*SLC*) bestellt. Eine Zusammenstellung aller SAR-Bilddaten ist in der Tab. 2 gegeben.

Abb. 12 zeigt eine ausgewählte ERS SAR-Viertelszene mit der Schober- und Glocknergruppe in der Bildmitte.

Von den in Tab. 2 angeführten Bilddaten wurden schlussendlich fünf SAR-Bildpaare mit möglichst kleiner effektiver Basislinie für die interferometrische Prozessierung ausgewählt (vgl. Tab. 3).

Sensor	Orbit	Frame	Datum	Type
ERS-1	20887	0941 ascending	13.7.1995	SLC-I
ERS-2	01214	0941 ascending	14.7.1995	SLC-I
ERS-1	21152	2655 descending	1.8.1995	SLC-I
ERS-2	01479	2655 descending	2.8.1995	SLC-I
ERS-1	21424	2655 descending	20.8.1995	SLC
ERS-2	01751	2655 descending	21.8.1995	SLC
ERS-2	13002	2655 descending	15.10.1997	SLC-I
ERS-2	17511	2655 descending	26.8.1998	SLC-I
ERS-1	41693	2655 descending	6.7.1999	SLC
ERS-2	22020	2655 descending	7.7.1999	SLC
ERS-1	42194	2655 descending	10.8.1999	SLC-I
ERS-2	22521	2655 descending	11.8.1999	SLC-I
ERS-2	28032	2655 descending	30.8.2000	SLC
ERS-2	33042	2655 descending	15.8.2001	SLC
ERS-2	33543	2655 descending	19.9.2001	SLC-I

SLC ... *Single Look Complex*

SLC = Vollszene (100 km × 100 km), SLC-I = Viertelszene (50 km × 50 km)

Tab. 2: ERS-1/2-Radarbilddaten.

Orbit-Bildpaar	parallele Basiskomponente (m) (<i>parallel baseline</i>)	orthogonale Basiskomponente (m) (<i>normal baseline</i>)	Zeitunterschied (Tage) (<i>temporal baseline</i>)
(1.8.1995)-(2.8.1995)	-18	-52	1
(20.8.1995)-(21.8.1995)	40	-89	1
(6.7.1999)-(7.7.1999)	45	85	1
(15.10.1997)-(26.8.1998)	49	153	315
(30.8.2000)-(15.8.2001)	-77	-20	350

Tab. 3: ERS-1/2 SAR-Bildpaare für die interferometrische Prozessierung.

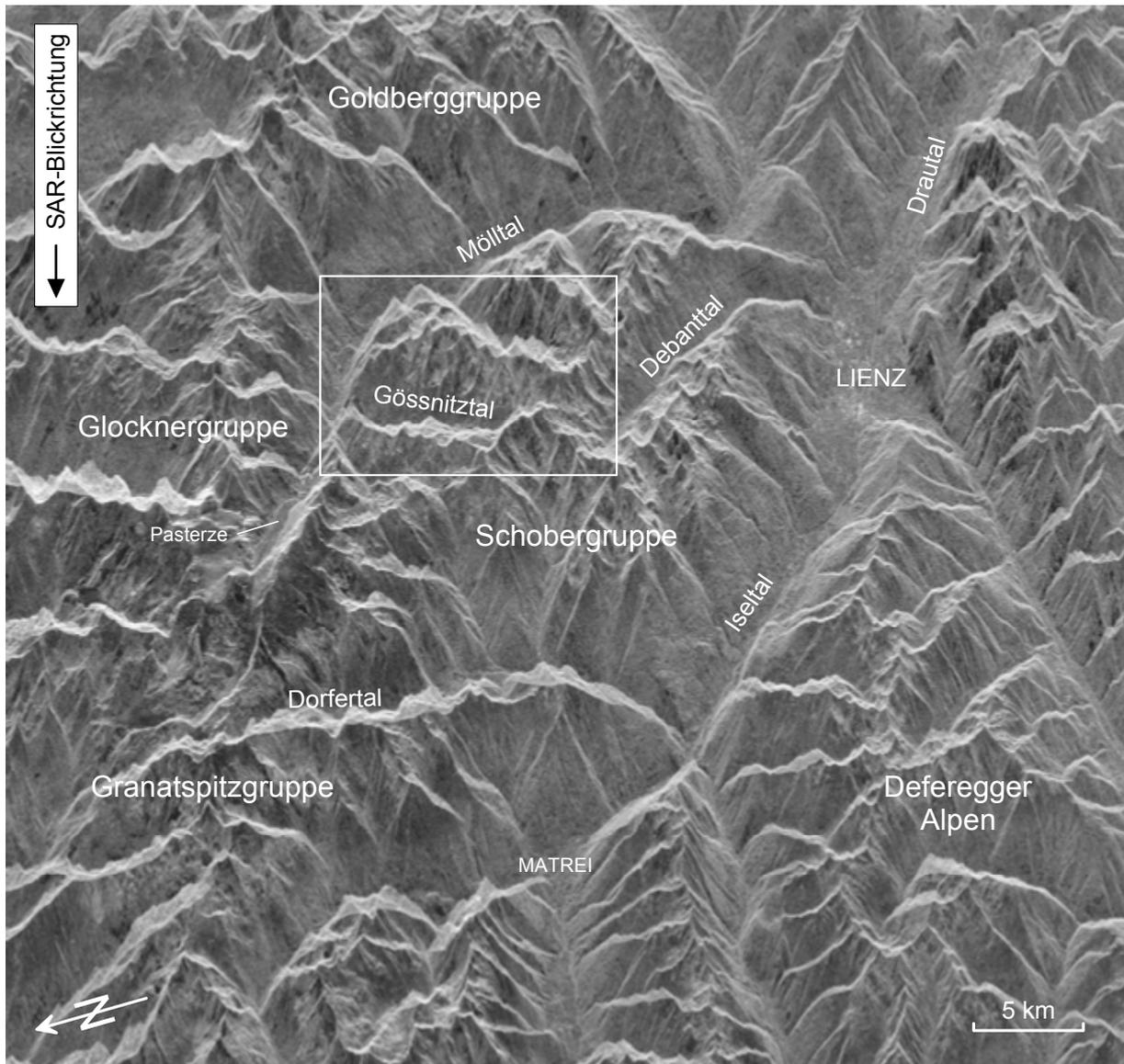


Abb. 15: ERS SAR-Amplitudenbild (ca. 50 km × 50 km, SAR-Viertelszene, Schrägdistanzdarstellung) des Orbit-Bildpaares (15.10.1997)- (26.8.1998). Die Amplitude des rückgestreuten Radarechos ist als Grauton dargestellt. Um einen orthoskopischen Raumeindruck des aufgenommenen Geländes zu erhalten, muss bei der Bildbetrachtung die SAR-Blickrichtung stets zum Betrachter orientiert sein. Das Studengebiet in der Schobergruppe ist mit einem weißen Rahmen gekennzeichnet.

5.3. DINSAR-Prozessierung

Die interferometrische Prozessierung der ausgewählten SAR-Bildpaare erfolgte mit der Software RSG⁷ (Remote Sensing Software Graz) am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Graz. Das eingesetzte Softwarepaket ist ein Zusatzmodul des Bildverarbeitungssystems ERDAS Imagine. Die Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte entspricht der in der Literatur (vgl. vorheriges Kapitel) beschriebenen klassischen interferometrischen Prozessierungskette:

1. Koregistrierung der beiden Datensätze (Referenz- und Vergleichsbild) eines Bildpaares mit hoher Genauigkeit (1/30 Pixel);
2. Entzerrung (Resampling) des Vergleichsbildes (= zweite SAR-Szene) auf die Geometrie des Referenzbildes (= erste SAR-Szene);

⁷ Joanneum Research: RSG in ERDAS IMAGINE, Tour Guide, Version 2.0 & Field Guide, Version 1.0, 1997.

3. Berechnung der interferometrischen Phase mit *Multilook*-Bildung.
Die Anzahl der *Looks* in Azimut-Richtung wurde mit 5 gewählt, um eine resultierende SAR-Bodenauflösung von ca. 20 m × 20 m zu erhalten. Es wurde davon ausgegangen, dass mit dieser Auflösung Blockgletscher bzw. Gletscher kleiner Größe (20 Hektar) noch gut aufzulösen sind;
4. Messen von Passpunkten für die Neuberechnung der Bahn- und Abbildungsparameter;
5. Elimination der durch die Topographie induzierten Phase (= Erstellen des differentiellen Interferogramms);
6. Phase-Unwrapping;
7. Geokodierung;
8. Skalierung der Phasenwerte in äquivalente Verschiebungswerte, z.B. in cm-Werte.

5.4. Bewertung der differentiellen Interferogramme

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wurde die Analyse der Interferogramme auf den Bereich des Gössnitzals beschränkt (vgl. Abb. 15, Abb. 16 und Abb. 18). Bewegungen bzw. Verschiebungen können im stark bewegten Gelände – ebene Bereiche seien hier ausgenommen – generell nur in jenen Berghängen erkannt werden, welche dem SAR-Sensor abgewandt sind. Da alle ausgewählten SAR-Bilddaten im *descending* Orbit (= Satellitenspur mit absteigendem Knoten; Satellit fliegt von N nach S) bei einem Inklinationwinkel der Satellitenbahn von ca. 16° aufgenommen wurden, können bei dieser Konstellation i.a. nur westorientierte Hänge für eine Auswertung in Betracht gezogen werden (vgl. dazu nochmals Abb. 15). Ferner ist die DINSAR-Methode unempfindlich gegenüber Bewegungen quer zur SAR-Blickrichtung.

Unter den prozessierten SAR-Bildpaaren gibt es drei mit einem Tag Zeitunterschied zwischen den Aufnahmen und zwei mit mehr als 300 Tagen. Es stehen jedoch keine SAR-Bildpaare mit 35, 70 oder eventuell 105 Tagen Zeitdifferenz im gegenständlichen Projekt zur Verfügung. Die Abb. 17 und Abb. 19 zeigen repräsentative Beispiele für die berechneten differentiellen Interferogramme. Während die „eintägigen“ Interferogramme sehr gute Szenenkohärenz zeigen, ist bei den „einjährigen“ Interferogrammen nahezu für den gesamten Bildausschnitt eine gänzliche Dekorrelation der SAR-Signale zu erkennen. Somit bleiben die ERS-Tandembildpaare für eine mögliche Bewegungsdetektion übrig. Leider sind auch diese Bildpaare für eine Detektion von Blockgletschern und anderen langsam fließenden Gletschern ungeeignet. Bei einer maximalen angenommenen Verschiebung von etwa 2,1 mm/Tag in SAR-Blickrichtung – dies entspricht einer Horizontalbewegung von 2 m/Jahr bei Annahme eines ebenen Geländes – kann im Vergleich zur Messunsicherheit (ca. ±7 mm) eines einzelnen SAR-Interferogramms die Bewegung nicht signifikant detektiert werden.

Um die Bewegung von Blockgletschern in der Schobergruppe bzw. auch in anderen Gebirgsregionen detektieren zu können, müsste die Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen – ERS-1/2-Bilddaten seien hier wiederum vorausgesetzt – entsprechend groß sein, um Verschiebungen signifikant auflösen zu können. Da der Wiederholungszyklus der ERS-1/2-Satelliten bei 35 Tagen liegt, böten sich Intervalle von 35, 70 und eventuell 105 Tagen für die schneefreie Periode im Zeitraum Sommer bis früher Herbst (nördliche Hemisphäre) an. Vgl. dazu das erfolgreiche Experiment am Beispiel des Dösener Blockgletschers.

Die Kohärenz der SAR-Signale kann durch die differentielle Bewegung bzw. Kippung von einzelnen Blöcken der Blockgletscheroberfläche empfindlich gestört werden. Diese i.a. visuell nicht wahrnehmbare Veränderung der Oberflächengeometrie ist umso größer, je schneller sich der Blockgletscher bewegt. Bei sich besonders rasch bewegendem Blockgletschern müsste die Zeitdifferenz der SAR-Aufnahmen entsprechend kurz sein. Im Falle des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar ist jedoch aufgrund seiner besonders hohen Aktivität mit einer relativ schnellen Dekorrelation der SAR-Signale zu rechnen. Bei einem Zeitunterschied von einem Jahr (von einem Sommer zum anderen) muss mit größter Wahrscheinlichkeit mit völliger Dekorrelation gerechnet werden. In diesem Zusammenhang lässt sich auch das Ergebnis der DINSAR-Auswertung vom Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar, Ötztaler Alpen, gut verstehen: ROTT & SIEGEL 1999 und NAGLER et al. 2001 führen die am unteren Zungenende des Blockgletschers für einen Beobachtungszeitraum von 35 Tagen festgestellte Dekorrelation ebenfalls auf die Kinematik des Blockgletschers zurück. Die Bewegungsbeträge betragen im Bereich des Zungenendes ca. 2 m/Jahr, was diesen Blockgletscher bezüglich seiner Bewegungsdynamik mit dem Blockgletscher im Hinteren Langtalkar vergleichbar macht.

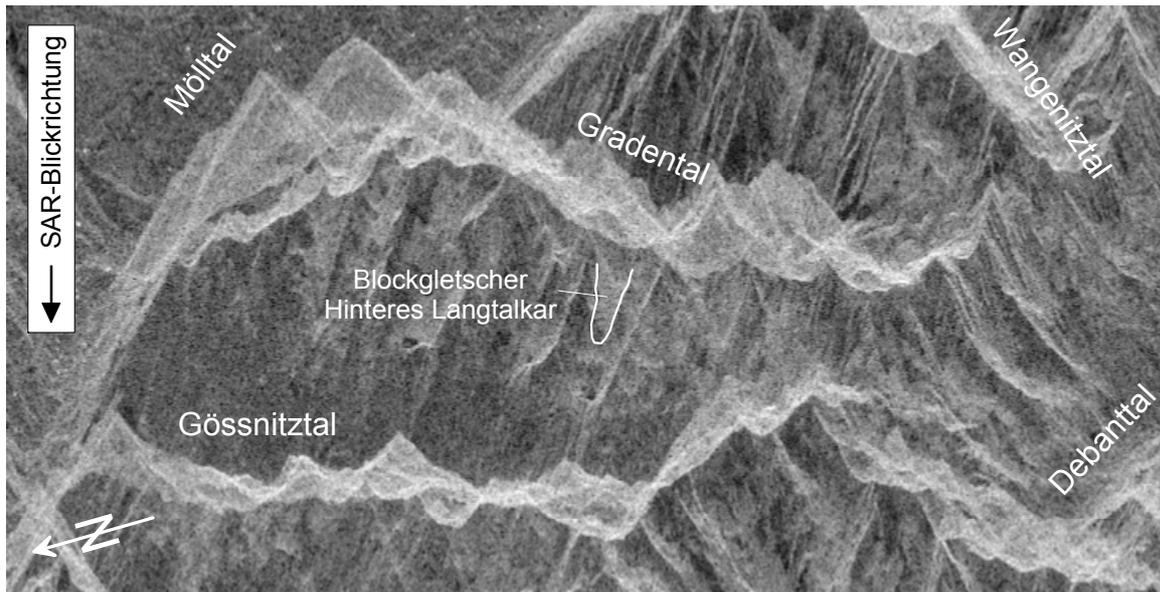


Abb. 16: ERS SAR-Amplitudenbild (Studiengebiet) des Orbitpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). Die Umgrenzungslinie des Blockgletschers Hinteres Langtalkar ist im Bild graphisch dargestellt.

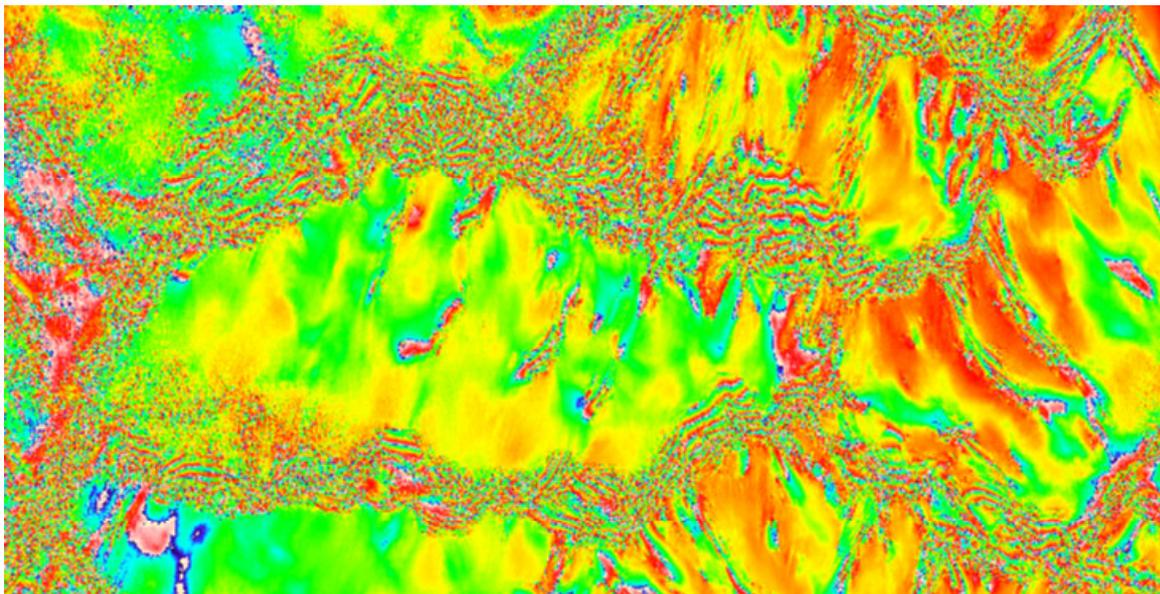


Abb. 17: Differenzielles SAR-Interferogramm für das in Abb. 5 dargestellte Studiengebiet des Orbitpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). Der Zeitunterschied beträgt 1 Tag. Die berechneten *wrapped* Phasenverschiebungen (modulo 2π) in SAR-Blickrichtung sind farbkodiert dargestellt. Die Kohärenz der Radarsignale ist hoch. In den *Layover*-Bereichen sind *fringes* zu sehen. Im Bereich des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar sind jedoch keine durch Oberflächenbewegung induzierten Phasenverschiebungen zu erkennen – die tägliche Bewegungsrate des Blockgletschers ist zu gering, um signifikante Aussagen zur Kinematik machen zu können. Systematische Phasenfehler sind auf die mangelnde Qualität des digitalen Geländemodells zurückzuführen.

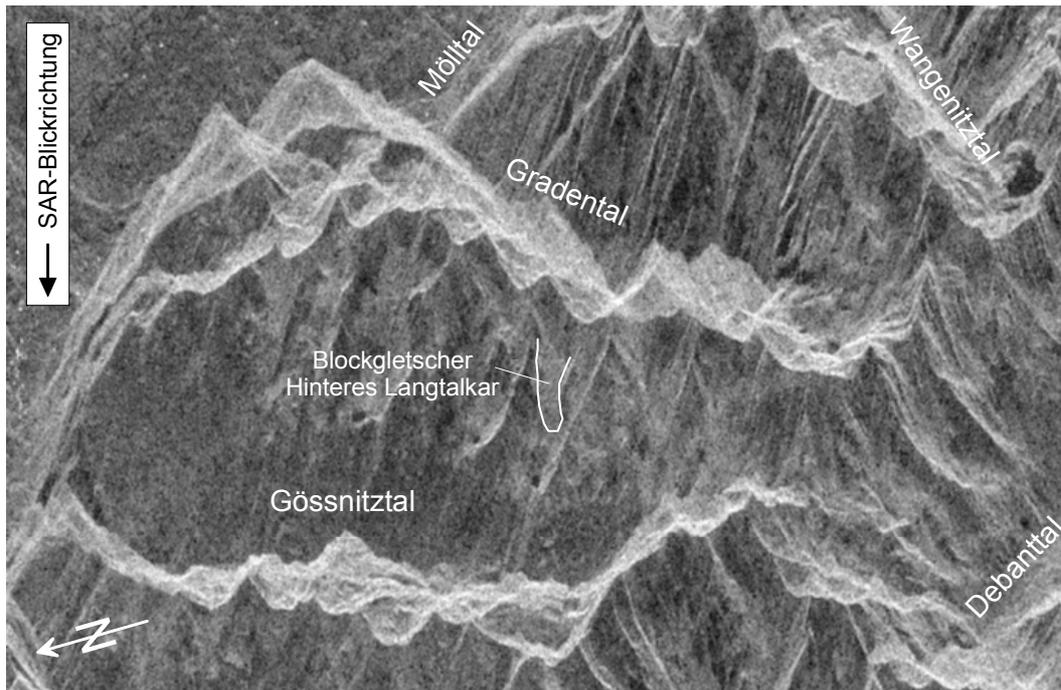


Abb. 18: ERS SAR-Amplitudenbild (Studiengebiet) des Orbitpaares (15.10.1997)-(26.8.1998). Die Umgrenzungslinie des Blockgletschers Hinteres Langtalkar ist im Bild graphisch dargestellt.

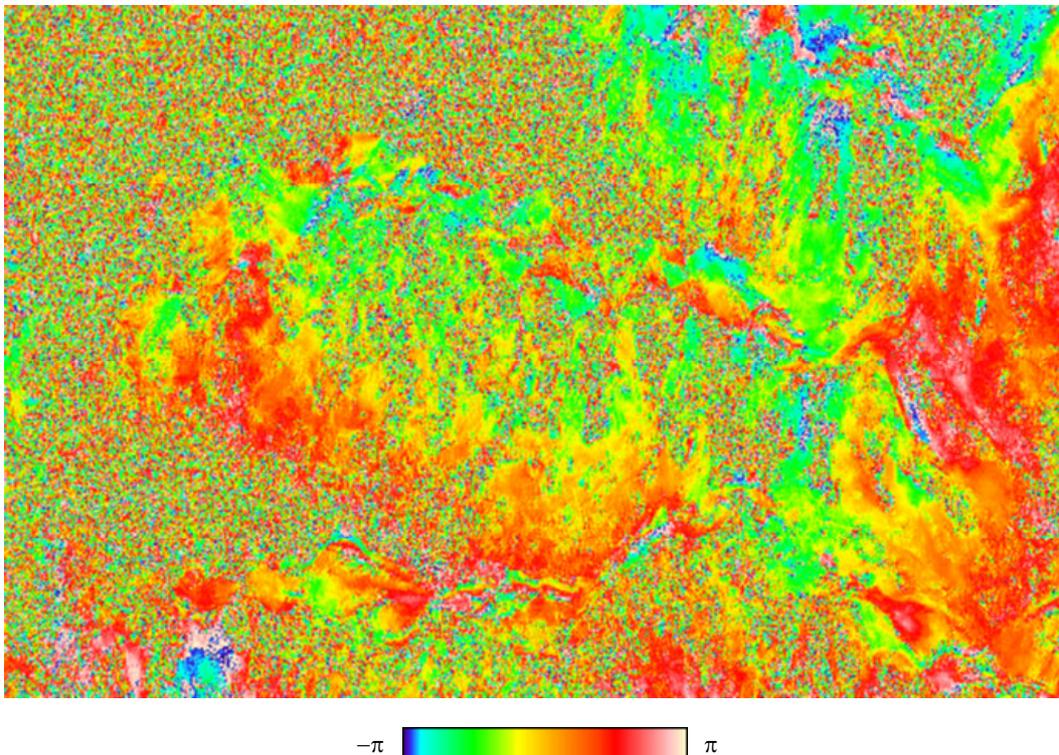


Abb. 19: Differentielles SAR-Interferogramm für das in Abb. 7 dargestellte Studiengebiet des Orbitpaares (15.10.1997)-(26.8.1998). Der Zeitunterschied beträgt 315 Tage. Die berechneten *wrapped* Phasenverschiebungen (modulo 2π) in SAR-Blickrichtung sind farbkodiert dargestellt. Große Bereiche, wie z.B. Tallagen, bewaldete Gebiete und Regionen oberhalb von 2300 m, sind dekorreliert.

5.5. Zusammenfassung und Ausblick

Für eine optimale Erfassung der Bewegung von Blockgletschern im Hochgebirge mittels DINSAR aus ERS-1/2-Bilddaten können folgende Voraussetzungen definiert werden (vgl. dazu auch ROTT & SIEGEL 1999, NAGLER et al. 2001 und STROZZI et al. 2005):

1. Der Blockgletscher muss in einem dem SAR-Sensor abgewandten Hang (*back slope*) liegen.
2. Die Hauptfließrichtung des Blockgletschers sollte möglichst parallel zur SAR-Blickrichtung sein.
3. Keine Schneebedeckung bzw. keine Altschneeflächen. Somit ergibt sich für Studiengebiet auf der Nordhalbkugel eine Einschränkung der möglichen Aufnahmezeitpunkte auf die Sommer- bzw. frühen Herbstmonate.
4. Der Blockgletscher sollte im besten Falle in einem westorientierten Hang liegen. Aufnahmen im *ascending* Orbit – in diesem Fall sollte der Blockgletscher in einem ostorientierten Hang eingebettet sein – liegen nur im beschränkten Umfang vor, da diese Aufnahmen batteriegepuffert im Erdschatten gewonnen werden.
5. Die Aufnahmen sollten in einem zeitlichen Abstand von 35 Tagen (für schnell bzw. mittelschnell fließende Blockgletscher) bzw. 70 Tagen (langsam fließende Blockgletscher, 10 cm/Jahr) oder eventuell 105 Tagen aufgenommen worden sein.
6. Der Blockgletscher sollte nicht zu klein sein. *Multilook*-Bildung zur Rauschunterdrückung sollte möglich sein, ohne dass die Detailauflösung zu stark leidet.

Da die Dekorrelation der SAR-Signale im L-Band (1,3 GHz, 23,5 cm Wellenlänge) wesentlich geringer ist als im C-Band (5,3 GHz, 5,7 cm), sollte die interferometrische Prozessierung von L-Band-Daten wesentlich verbesserte Ergebnisse bringen (vgl. ERIKSSON et al. 2004, STROZZI et al. 2004, WEGMÜLLER et al. 2004). Es wird daher empfohlen, die Studien zum Blockgletscher-Monitoring mit SAR-Daten des japanischen Aufnahmesystems ALOS⁸ PALSAR fortzusetzen. Der Start von ALOS-Mission ist für den Herbst 2005 geplant.

Für weitere Untersuchungen bietet sich die TerraSAR-X-Mission⁹ (Infoterra GmbH) an, welche im Jahr 2006 gestartet werden soll. Das Mikrowellensystem arbeitet im X-Band (Frequenzbereich 9.65 GHz, 3,1 cm Wellenlänge) und der Wiederholzyklus der Satellitenbahn beträgt 11 Tage. Insbesondere sollen die Flugbahnen mit großer Genauigkeit eingehalten werden können. Dies würde äußerst kleine interferometrische Basislinien ermöglichen. Dadurch ergeben sich verbesserte Anwendungsmöglichkeiten von DINSAR im allgemeinen und im „Gletscher“-Monitoring im speziellen. Bei dem im Vergleich zu ERS-1/2 verkürzten Wiederholungszyklus der Aufnahmen ist eine wesentlich verminderte Dekorrelation der Radar-Echos zu erwarten. Weiters ermöglicht das X-Band im Vergleich zum C-Band eine wesentlich genauere Verschiebungsmessung – ein Phasenzyklus entspricht einer Verschiebung von 1,5 cm. Durch die kleinen Basislinien wird der topographisch bedingte Phasenanteil sehr klein sein, und es kann daher das „einfache“ Interferogramm (INSAR) direkt als Verschiebungsbild interpretiert werden.

5.6. Literatur

- AVIAN, M., KAUFMANN, V. & LIEB, G.K., 2005: Recent and Holocene dynamics of a rock glacier system – the example of Langtalkar (Central Alps, Austria). *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography* 59, Oslo, 1-8.
- BAUER, A., PAAR, G. & KAUFMANN, V., 2003: Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, Vol. 1*, 55-60.
- BUCHENAUER, H.W., 1990: Gletscher- und Blockgletschergeschichte der westlichen Schobergruppe (Osttirol). *Marburger Geographische Schriften* 117, 276 S.
- ERIKSSON, L.E.B., SCHMULLIUS, CH. & WIESMANN, A., 2004: Temporal decorrelation of spaceborne L-band repeat-pass SAR interferometry. *Proceedings 4th Int. Symp. on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria*, 162-169.

⁸ ALOS ... Advanced Land Observing Satellite
PALSAR ... Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
Weitere Informationen siehe <http://alos.nasda.go.jp/index-e.html>.

⁹ Weitere Informationen zu TerraSAR-X siehe <http://www.terrasar.de/>.

- KAUFMANN, V. & PLÖSCH, R., 2000: Mapping and visualization of the retreat of two cirque glaciers in the Austrian Hohe Tauern National Park. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam 2000, 446-453.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2004: Documentation of the retreat of a small debris-covered cirque glacier (Goessnitzkees, Austrian Alps) by means of terrestrial photogrammetry. *Proceedings of 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Núria, Catalonia, Spain, Monografies tècniques 8, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 65-76.*
- KIENAST, G. & KAUFMANN, V., 2004: Geodetic measurements on glaciers and rock glaciers in the Hohe Tauern National park (Austria). *Proceedings of 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Núria, Catalonia, Spain, Monografies tècniques 8, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 101-108.*
- LIEB, G.K. & KAUFMANN, V., 1985: Vier Jahre Gletschermessungen in der Schobergruppe. *Kärntner Naturschutzblätter* 24, 123-135.
- LIEB, G.K., 1987: Die Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe und ihre Entwicklung seit dem Spätglazial. Unveröffentlichte Dissertation, Graz, 286 S.
- LIEB, G.K., 2000: Die Flächenänderungen von Gössnitz- und Hornkees (Schobergruppe, Hohe Tauern) von 1850 bis 1997. *Salzburger Geographische Arbeiten* 36, Festschrift für Heinz Slupetzky zum 60. Geburtstag, 83-96.
- LIEB, G.K., KAUFMANN, V., KROBATH, M. & SULZER, W., 1999: Gößnitzkees und Hornkees - die Entwicklung zweier Kargletscher der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) seit dem Hochstand von 1850. Unpubl. Abschlussbericht im Rahmen eines Forschungsprojektes der Kärntner Nationalparkverwaltung, Institut für Geographie, Universität Graz, 76 S.
- NAGLER, TH., MAYER, CH. & ROTT, H., 2001: Feasibility of DINSAR for Mapping Complex Motion Fields of Alpine Ice- and Rock-Glaciers. *Proceedings of 3rd Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield, UK, 377-382.*
- ROTT, H. & SIEGEL, A., 1999: Analysis of Mass Movements in Alpine Terrain by Means of SAR Interferometry. *Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, Germany, 1933-1936.*
- STROZZI, T., FARINA, P., CORSINI, A., ZILGER, J., WIESMANN, A., WEGMÜLLER, U. & WERNER, C., 2004: Demonstration of the capabilities of L-band SAR interferometry for landslide deformation monitoring using JERS-1 data. *Proceedings 4th Int. Symp. on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 388-395.*
- STROZZI, T., SCHWAB, S., WEGMUELLER, U., GRAF, K., RAETZO, H., MANUNTA, P. & PAGANINI, M., 2005: Large scale survey of mountain permafrost displacement in alpine areas from satellite radar interferometry. In: *Programme and Abstracts, 2nd European Conference on Permafrost, 12-16 June, 2005, Potsdam, Germany, Terra Nostra, Heft 2, 2005, Selbstverlag der GeoUnion Alfred-Wegener-Stiftung, Berlin, S. 195.*
- WEGMÜLLER, U., WERNER, C., STROZZI, T. & WIESMANN, A., 2004: Potential and challenges of SAR interferometric techniques for the monitoring of mining induced surface deformation. *Proceedings 4th Int. Symp. on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 312-319.*

6. Zur Topographie und Morphodynamik des Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich)

V. KAUFMANN

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz¹⁰ wird über die quantitative Erfassung der Morphodynamik des besonders aktiven Blockgletschers Hinteres Langtalkar (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich) mittels digital-photogrammetrischer und geodätischer Methoden berichtet. Repräsentative Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten sind in einer kombinierten Bild-Strichkarte, welche sich aus einer Luftbildkarte 1:5 000 und weiteren thematischen Nebenkarten zusammensetzt, kartographisch aufbereitet.

6.1. Einleitung

Die Erfassung und Visualisierung von glazialen und periglazialen Prozessen ist aus aktuellem Anlass (gesteigertes Gefahrenpotenzial im Hochgebirgsraum durch Klimaveränderung) verstärkt in den Mittelpunkt von methodischen, aber auch angewandten Studien gerückt (KAAB et al. 2003). In diesem Aufsatz soll ein Blockgletscher mit besonders interessantem Fließ-/Kriechverhalten vorgestellt werden. Blockgletscher sind Schutt-Eis-Gemische, die sich aufgrund plastischer Deformation ihres Eisgehaltes der Schwerkraft folgend mit langsamer Geschwindigkeit talabwärts bewegen (BARSCH 1996). Ihre Oberflächenstruktur mit den oft gut ausgeprägten Fließwülsten erinnert stark an Lavaströme. Das Kriechphänomen Blockgletscher spielt in der Permafrost- bzw. Klimaforschung eine besondere Rolle (HAEBERLI 2000).

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz wurden und werden vom Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz drei im Nationalpark Hohe Tauern liegende, jedoch in ihrer Morphologie unterschiedliche Blockgletscher untersucht. Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar wurde 1999 in dieses interdisziplinäre Blockgletscher-Monitoringprogramm aufgenommen.

Diesem Aufsatz liegt eine dem gestellten Thema gewidmete Karte bei (siehe Beilage). Die nachfolgenden Ausführungen nehmen auf diese Karte Bezug.

Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar liegt in der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Österreich, siehe Übersichtskärtchen der Kartenbeilage). Über geographische, geologische und auch hydrologische Aspekte des Studienobjektes geben LIEB 1987 bzw. KRÄINER & MOSTLER 2001 Auskunft. Der nördliche, zungenförmige Lobus des Blockgletschers ist ca. 850 m lang und hat eine mittlere Breite von 200 m. Auf den südlichen, nur wenig aktiven Teil des Blockgletschers wird in diesem Aufsatz nicht näher eingegangen.

Im Zuge einer anderen vom Nationalpark Hohe Tauern geförderten Studie wurde der Autor bei Luftbildauswertungen auf eine am Zungenende des Blockgletschers sichtbare Rutschungszone aufmerksam. Deren topographische Besonderheit liegt darin, dass sich der Blockgletscher mit seinem unteren Zungenende über eine steile Geländestufe schiebt. Durch gravitative Beanspruchung des Permafrostkörpers im Stirnbereich wurde im Laufe der Zeit diese ausgeprägte Rutschung ausgelöst (siehe Haupt- und Nebenkarten). Aufgrund von vorhandenen Luftbildaufnahmen und Geländebeobachtungen kann das Eintreten dieses Rutschungsereignisses in den Zeitraum zwischen 1992 und 1994 eingeschränkt werden.

Um die Morphodynamik (Kinematik) des Blockgletschers im Detail studieren zu können, wurden vorerst photogrammetrische und auch geodätische Arbeiten durchgeführt. In Erweiterung des messtechnischen Methodenspektrums wurden auch das terrestrische Laserscanning (speziell für den Bereich der stark rutschungsgefährdeten und steinschlägigen Blockgletscherstirn) und die satellitengestützte Radarinterferometrie (zur Bewegungsmessung im rutschungsfreien Bereich) eingesetzt (vgl. BAUER et al. 2003, KENYI & KAUFMANN 2003).

¹⁰ Dieser Aufsatz wurde in den Kartographische Nachrichten, 54 (6), 258-262, abgedruckt. Die Auflagenzahl betrug 4500 Stück. Der Kartendruck wurde aus Mitteln des gegenständlichen NP-Projektes finanziert.

6.2. Photogrammetrische Bewegungsmessung

Für die morphometrische Dokumentation der raum-zeitlichen Entwicklung von Blockgletschern und insbesondere ihres Fließ-/Kriechverhaltens – dies über größere Zeiträume, flächendeckend und auch zeitlich über mehrere Dekaden zurückreichend – eignen sich besonders Luftmessbilder. Solche wurden von 11 verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (1954-1999) einem digital-photogrammetrischen Auswerteprozess unterzogen. Das analoge Filmmaterial wurde mit einem Präzisionsbildscanner UltraScan 5000 von Vexcel Imaging Austria mit einer Bildelementgröße von 10 μm digitalisiert. Als topographische Grundlage für die Kartenerstellung und auch für die weiterführenden photogrammetrischen Arbeitsschritte wurde ein hochauflösendes digitales Höhenmodell (2 m Stützstellenabstand) durch manuelle Auswertung am analytischen Stereoauswertegerät gewonnen. Für das Bildflugjahr 1974 wurde ebenfalls – jedoch nur auf den Blockgletscherbereich beschränkt – ein ähnlich genaues Höhenmodell manuell ermittelt.

Die dynamische Veränderung der Blockgletscheroberfläche kann durch die Bestimmung von dreidimensionalen (3D) Verschiebungsvektoren von markanten Oberflächenelementen (z.B. von Felsblöcken) bzw. von unverwechselbaren Strukturen (Phototexturen) bestimmt werden. Die manuelle photogrammetrische Messung ist sehr aufwendig und muss sich auf einige wenige Punkte beschränken (KAUFMANN 1996). Simultanes stereoskopisches Messen in multitemporalen Luftmessbildern beschleunigt die Messung wesentlich und verbessert die Messgenauigkeit (KÄÄB et al. 1997). Durch die modernen digital-photogrammetrischen Methoden wie z.B. die digitale Punktübertragung lassen sich viele Auswerteprozesse automatisieren und dadurch auch weiter beschleunigen. An der Universität Zürich wurde eine diesbezügliche Software entwickelt (KÄÄB & VOLLMER 2000).

6.2.1. Automatische Messung von 3D-Verschiebungsvektoren

Seit mehreren Jahren werden auch ähnliche Entwicklungen am Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz durchgeführt (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2003): Für die Ermittlung von 3D-Verschiebungsvektoren und auch von digitalen Geländehöhenmodellen wurde ein spezielles Softwarepaket ADVM (Automatic Displacement Vector Measurement) entwickelt. Eine Besonderheit dieser Software ist, dass die automatische Punktmessung, d.h., das Verfolgen von markanten Texturen der Blockgletscheroberfläche, nicht in den Luftbild-Scans erfolgt, sondern in davon abgeleiteten Bildern, den sog. Pseudo-Orthophotos. Diese Vorhansweise lehnt sich an den Arbeiten von SCHENK et al. 1990 und BALTSAVIAS 1996 an und führt zu einer strengen photogrammetrischen Lösung. Die gewählte Vorgangsweise hat den Vorteil, dass Luftmessbilder unterschiedlicher Maßstäbe und Orientierung geometrisch relativ leicht miteinander verglichen werden können. Insbesondere können bereits bei Verwendung eines grob auflösenden Geländehöhenmodells die reliefbedingten Bildverzerrungen größtenteils vorab eliminiert werden. Die Software erlaubt simultane Punktübertragung zwischen mehreren Bildern einer Epoche unter Ausnutzung der Kernstrahlgeometrie basierend auf dem MGCM-Algorithmus von BALTSAVIAS (1991). Für die Punktübertragung zwischen Bildern unterschiedlicher Epochen können ebenfalls geometrische Bedingungen angesetzt werden, wie z.B. dass die Fließbewegung der Richtung der Falllinie des Geländes zu folgen hat. Durch die Adaption des MGCM-Algorithmus für die Pseudo-Orthophotogeometrie und Einführung der erwähnten Bedingung aus dem Fließmodell wird eine hochgenaue und zuverlässige Punktübertragung gewährleistet. Das Resultat ist ein dichtes 3D-Vektorfeld, aus dem u.a. flächendeckend die Fließgeschwindigkeit abgeleitet werden kann.

6.2.2. Ergebnisse

Die mittlere der drei Nebenkarten zur Hauptkarte zeigt die mittlere jährliche horizontale Fließbewegung für den Zeitraum 1969-1991 in Form von Linien gleicher Geschwindigkeit (Isotachen). Aus dem Isolinenbild ist zu erkennen, dass die Fließgeschwindigkeit von unterhalb der Wurzelzone des Blockgletschers bis zum Zungenende kontinuierlich zunimmt. Die erzielte Genauigkeit der Geschwindigkeitsangabe liegt bei ± 1 cm/Jahr. Aufgrund der großen Oberflächenänderungen zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten (Intervall von 22 Jahren) war eine Messung von homologen Oberflächentexturen im unteren Zungenbereich nicht mehr möglich. Man beachte den Geländespalt (links vom Textblock „keine Bewegungsmessung möglich“), welcher die bevorstehende Auflösung des bis dahin kompakten Zungenendes erahnen lässt. Andere markante Quer-Furchen lassen sich schon in den ältesten Luftbildern im mittleren Bereich des Blockgletschers erkennen (vgl. obere Nebenkarte, Bereich der Höhenlinie 2660 m). Für den Beobachtungszeitraum 1969-1974 wurde an der Oberkante der Blockgletscherstirn eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 1,35 m/Jahr gemessen. Aus dem Vergleich der photogrammetrisch ermittelten Geländehöhenmodelle 1974 und 1998 kann das Volumen der

Rutschungsmasse mit ca. 170 000 m³ abgeschätzt werden. Eine Abschätzung der Massenbilanz für den gesamten Blockgletscher ergibt einen signifikanten Volumenverlust von -45 000 m³, der größtenteils auf das Abschmelzen von Eis im Permafrostkörper zurückzuführen ist. Aus den photogrammetrischen Vergleichsmessungen der Aufnahmezeitpunkte 1969, 1991, 1997 und 1998 lässt sich eine signifikante, kontinuierliche Zunahme der Bewegungsraten belegen. Für den unteren, noch nicht ganz von der Rutschung betroffenen Zungenbereich wurden für den Zeitraum 1997-1998 maximale Punktverschiebungen von bis zu 2,8 m/Jahr in Horizontalrichtung gemessen.

6.3. Geodätische Bewegungsmessung

Im Jahre 1999 wurde in Zusammenarbeit mit dem nunmehrigen Institut für Navigation und Satellitengeodäsie der Technischen Universität Graz ein geodätisches Messnetz bestehend aus zur Zeit 17 stabilen Netz- und Versicherungspunkten und weiteren 38 Beobachtungspunkten am Blockgletscher eingerichtet. Die in der Haupt- und in der unteren Nebenkarte ersichtlichen Vermessungspunkte sind in der Natur durch Messingbolzen im Fels dauerhaft markiert. Das geodätische Hauptnetz wurde durch kombinierte Richtungs- und Streckenmessung sowie durch zusätzliche GPS-Messungen im Koordinatensystem der Österreichischen Landesaufnahme festgelegt. Seit 2000 erfolgte nun alljährlich (Mitte/Ende August) eine Wiederholungsmessung der Beobachtungspunkte am Blockgletscher. Die örtliche Polarpunktaufnahme erfolgt von jenem Netzpunkt aus, welcher sich nördlich des Blockgletschers auf einer Felsnase befindet (siehe Kartenbeilage, Punkt mit K. 2676,6).

6.3.1. Ergebnisse

Die aus jeweils zwei aufeinander folgenden Jahresmessungen ermittelten 3D-Bewegungs-/Verschiebungsvektoren ergeben ein repräsentatives, wenn auch nur im Vergleich zur Photogrammetrie punktuelles Abbild der Morphodynamik des Blockgletschers für den jeweiligen Beobachtungszeitraum (vgl. untere Nebenkarte für den Zeitraum 1999-2000). Vergleicht man die geodätisch ermittelten Bewegungsvektoren der einzelnen Jahresintervalle miteinander, so lassen sich keine signifikanten Richtungsänderungen der Vektoren erkennen; sehr wohl aber können Änderungen in den Bewegungsraten von bis zu 16% (aktueller Wert) bei den Punkten mit den größten Verschiebungsbeträgen festgestellt werden.

Die Auswertung der letztjährigen Messung (2003) ergab folgende mittlere Bewegungsraten in horizontaler Richtung: 15 cm/Jahr für die obersten und 1,72 m/Jahr für die untersten Beobachtungspunkte. Durch die von oben nach unten zunehmende Fließgeschwindigkeit kommt es zwangsläufig zu Dehnungseffekten. Bei Überschreitung der kritischen Spannung führt dies u.a. zu den schon angesprochenen Quer-Furchen (siehe Hauptkarte bei den K. 2654,6 und 2647,9) und den besonders auf der orographisch rechten Seite des Blockgletschers sichtbaren Auflösungserscheinungen der vormals kompakten Struktur des Permafrostkörpers. Im letztgenannten Bereich wurden Dehnungsraten von bis zu 16 mm Längenänderung auf 1 m Horizontalentfernung gemessen.

Schlussendlich konnten auch die photogrammetrischen Auswertergebnisse mit Hilfe der geodätischen Messungen überprüft werden. Die aus den Luftmessbildern 1997/98 in allen Beobachtungspunktlagen automatisch abgeleiteten Bewegungsvektoren stehen im Einklang mit den aus den geodätischen Messungen 1999-2000 ermittelten. (vgl. KAUFMANN & LADSTÄDTER 2003).

6.4. Anmerkungen zur Kartenbeilage

Für die Visualisierung der Topographie und Morphodynamik wurde eine kombinierte Bild-Strichkarte (Format 698 mm x 375 mm) im Maßstab 1:5 000 gewählt. Aus Kostengründen wurde auf eine Farbversion, welche insbesondere die spärliche Hochgebirgsvegetation durch Verwendung der in der digitalen Datenbasis vorhandenen Farbinfrarot-Orthophotos wiedergeben hätte können, verzichtet. Die Kartenerstellung erfolgte mit dem Programmpaket CorelDRAW 10. Geht es um die Visualisierung – insbesondere von dynamischen Vorgängen im Hochgebirgsraum –, so gibt es neben der Möglichkeit der Darstellung in einer klassischen, statischen Papierkarte auch zahlreiche computergestützte Möglichkeiten (vgl. KÄÄB et al. 2003). Einige davon wurden ebenfalls im Zuge der vorgestellten Arbeit realisiert und können auf der Homepage des Autors abgerufen werden. Im Rahmen der modernen Hochgebirgskartographie hat die klassische Papierkarte aber durchaus ihren berechtigten Stellenwert, zumal sie unmittelbar anschaulich ist und als Studienkarte ins Gelände mitgenommen werden kann.

6.5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Aufsatz wurden die bis jetzt (2003) durchgeführten photogrammetrischen und geodätischen Arbeiten am Blockgletscher Hinteres Langtalar erläutert. Eine thematische Karte im Maßstab 1:5 000 wurde zur Darstellung der topographischen Situation des Blockgletschers und seiner Umgebung sowie zur Visualisierung von ausgewählten, repräsentativen Ergebnissen der vorhin erwähnten Arbeiten erstellt.

Die interessante Frage der Morphogenese des Blockgletschers – im oberen Teil des Blockgletschers sind Moränen eines bereits abgeschmolzenen Gletschers zu sehen – wird im Zuge einer noch laufenden Studie des Institutes für Geographie und Raumforschung erörtert. Die geodätischen Messungen sollten in regelmäßigen Abständen (Jahresrhythmus) nach Maßgabe fachlicher Notwendigkeit (Forschungsbedarf, Abschätzung des Gefahrenpotenzials durch verstärkte Mobilisierung des Rutschprozesses) und Finanzierungsmöglichkeit fortgesetzt werden.

6.6. Literatur

- BALTSAVIAS, E.P., 1991: Multiphoto Geometrically Constrained Matching. *Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich* 49, 221 S.
- BALTSAVIAS, E.P., 1996: Digital ortho-images – a powerful tool for the extraction of spatial and geo-information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 51, 63-67.
- BARSCH, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments. *Springer Series in Physical Environment* 16, Springer Verlag, 335 S.
- BAUER, A., PAAR, G. & KAUFMANN, V., 2003: Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, Vol.1*, 55-60.
- HAEBERLI, W., 2000: Modern Research Perspectives Relating to Permafrost Creep and Rock Glaciers: A Discussion. *Permafrost and Periglacial Processes* 11 (4), 290-293.
- KÄÄB, A., HAEBERLI, W. & GUDMUNDSSON, G.H., 1997: Analysing the Creep of Mountain Permafrost using High Precision Aerial Photogrammetry: 25 Years of Monitoring Gruben Rock Glacier, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 8 (4), 409-426.
- KÄÄB, A. & VOLLMER, M., 2000: Surface Geometry, Thickness Changes and Flow Fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis. *Permafrost and Periglacial Processes* 11 (4), 315-326.
- KÄÄB, A., ISAKOWSKI, Y., PAUL, F., NEUMANN, A. & WINTER, R., 2003: Glaziale und periglaziale Prozesse: Von der statischen zur dynamischen Visualisierung. *Kartographische Nachrichten* 53 (5), 206-212.
- KAUFMANN, V., 1996: Der Dösender Blockgletscher – Studienkarten und Bewegungsmessungen. In: *Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich*. Hrsg.: W. Leitner. *Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität* 33, 141-162.
- KAUFMANN, V., & LADSTÄDTER, R., 2003: Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: Two case studies in the Austrian Alps. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, Vol. 1*, 525-530.
- KENYI, L.W. & KAUFMANN, V., 2003: Estimation of Rock Glacier Surface Deformation Using SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (6), 1512-1515.
- KRAINER, K. & MOSTLER, W., 2001: Der aktive Blockgletscher im Hinteren Langtal Kar, Gößnitztal (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern* 6, 139-168.
- LIEB, G.K., 1987: Die Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe und ihre Entwicklung seit dem Spätglazial. *Unveröffentlichte Dissertation, Graz*, 286 S.
- SCHENK, T., LI, J.-C. & TOTH, C.K., 1990: Hierarchical approach to reconstruct surfaces by using iteratively rectified imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 28, 5/1, 464-470.

Web-links

<http://www.cis.tugraz.at/photo/viktor.kaufmann/animations.html>

7. Differenzierung des Blockgletschers Hinteres Langtalkar aufgrund seiner Bewegungsdynamik

M. AVIAN

Zusammenfassung

Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar im hintersten Gössnitztal (östliche Schobergruppe) zeichnet sich durch eine komplexe Oberflächenmorphologie aus, welche den Blockgletscher schon optisch in verschiedene Bereiche teilt. Durch die Analyse des Bewegungsverhaltens kann der Blockgletscher auch in diesem Sinne in mehrere unterschiedliche Bereiche gegliedert werden. Dieser Blockgletscher gehört zu jenen, die die größten in Österreich gemessenen Bewegungsbeträge aufweisen (vgl. auch Blockgletscher im Inneren Reichenkar in den Stubai Alpen, KRAINER & MOSTLER 2000). Diese haben sich im Zeitraum 1991-1997 erheblich gesteigert, markante Wülste und Furchen prägen das Erscheinungsbild, der unterste Teil der Zunge zeigt Auflösungserscheinungen. Die Gründe hierfür sind nicht geklärt, meteorologische bzw. hydrologische Extremereignisse kommen ebenso in Frage wie das Überschreiten von Grenzzugspannungen an der Karschwelle.

Der nördliche, orographisch rechte Lobus zeigt deutlich träges Verhalten bis 1991, dann aber hat er einen dramatischen Anstieg seiner Aktivität zu verzeichnen. Eine deutliche Aktivitätsgrenze ist gegen den Wurzelbereich ausgebildet, die durch eine sehr ausgeprägte Querfurche sichtbar ist. Weitere Furchen sind im Entstehen. Der zentrale Lobus zeichnet sich durch eine über den gesamten Beobachtungszeitraum anhaltende starke Dynamik aus. Maximale jährliche Bewegungsraten mit über 270 cm/a (1997-1998) treten an einer ausgeprägten Geländekante auf, dieser Lobus zeigt eine kontinuierliche Abnahme der Bewegungsbeträge in Richtung Wurzelzone. Auch hier weist eine sich vergrößernde Furche auf eine Aktivitätsgrenze hin bzw. ist ein deutlicheres Einsinken der Oberfläche unterhalb der Furche zu erkennen. Der trägste Bereich des Blockgletschers ist der südliche Teil mit marginalen Bewegungsraten. Trotz der derzeit fehlenden Dynamik ist eine sehr ausgeprägte Struktur sichtbar, wahrscheinlich spiegeln sich darin ältere Aktivitätsphasen wider. Der Blockgletscher weist in seiner Massenbilanz einen markanten Substanzverlust auf, der Massenverlust bedingt einen durchschnittlichen Einsinkbetrag von ca. 1,2 cm/a.

Die Wurzelzone kann überwiegend als Bereich des Kargletschers von 1850 bezeichnet werden. Morphologisch ist eine ausgeprägte Depression sichtbar, die durch folgende Ansätze erklärbar wären:

1. Abreißen des Blockgletschers von seinem Schuttdargebotsbereich, in den obersten Bereichen sind keine Bewegungsbeträge feststellbar.
2. Ausschmelzen des ehemaligen Kargletschers von 1850.

Keiner der beiden Ansätze kann in dieser Arbeit vollkommen unterstützt oder abgelehnt werden, die Datenlage ist dafür noch unzureichend.

7.1. Einleitung

Blockgletscher sind gefrorene Schuttmassen bzw. Schutt-Eis-Gemische, die sich aufgrund plastischer Deformation ihres Eisgehalts der Schwerkraft folgend langsam abwärts bewegen (Definition in BARSCH 1996). Die Frage nach der Genese von Blockgletschern ist durch zwei Prozessansätze gekennzeichnet: die Entstehung aus Gletschern (z.B. KRAINER & MOSTLER 2001) und die als reine Permafrosterscheinung (z.B. HAEBERLI 1985). HUMLUM 1996 verweist auf Autoren, die Blockgletscher mit Gletschereiskernen nicht zu typischen Blockgletschern zählen, er spricht sich aber dafür aus, dass Blockgletscher als solche angesehen werden sollten, wenn sie wie Blockgletscher aussehen.

Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand der aktivste seiner Art in den Kärntner Hohen Tauern. Bewegungsmessungen des Instituts für Fernerkundung und Photogrammetrie an der Technischen Universität Graz werden seit 1999 unter der Leitung von Viktor Kaufmann durchgeführt. Nach weiteren Untersuchungen von Karl Krainer, Institut für Geologie und Paläontologie an der Universität Innsbruck, der den Blockgletscher hinsichtlich Aufbau, Dynamik und Genese untersuchte, war eine umfassende morphologische Interpretation der Bewegungsmessergebnisse der logische nächste Schritt.

Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar ist ein zungenförmiger Blockgletscher mit ausgeprägten longitudinalen und transversalen Rücken und Mulden sowie zwei Wurzelzonen. Die den Karbereich abschließenden Felswände sind durchwegs sehr steil, stark geklüftet und offensichtlich starker Frostverwitterung ausgesetzt. Große Mengen an Schuttmaterial stehen also zur Verfügung (Wurzelzone 1: grau gefärbter quarzitischer Glimmerschiefer, Wurzelzone 2: rot-braun verwitternder Glimmerschiefer). Der Stirnbereich des Blockgletschers ist steil und äußerst aktiv, viele Felsbrocken prägen das Vorgelände, auch ist ein hoher Anteil an oberflächlichem Feinmaterial zu sehen (vgl. auch LIEB 1987).

7.2. Bewegungsanalyse

Eckdaten:

Tiefster Punkt/Stirn: 2480 m

Höchster Punkt: 2740-2750 m

Länge: 600 m

Breite: 300 m

Für die hier dargestellte Bewegungsanalyse wurde sowohl auf photogrammetrische als auch auf geodätische Messergebnisse zurückgegriffen. Hinweise zu den photogrammetrischen Arbeiten finden sich in KAUFMANN & LADSTÄDTER 2003, das geodätische Messprogramm ist im Kap. 6 dieses Berichtes zusammengefasst.

Für folgende Zeiträume liegen photogrammetrisch ermittelte Kenngrößen zur Kinematik des Blockgletschers vor:

Periode 1: 9.10.1969 - 4.9.1991, 22 Jahre

Periode 9.10.1969 - 5.9.1974, 5 Jahre (keine flächendeckende Information)

Periode 2: 4.9.1991 - 16.9.1997, 6 Jahre

Periode 3: 4.9.1997 - 26.8.1998, 1 Jahr

7.2.1. Horizontalbewegungen

Periode 1, 1969-1991: Dieses in dieser Studie längste Beobachtungsintervall zeichnet sich durch Bewegungsraten bis knapp 100 cm/a in den aktivsten Zonen aus. Die Bewegungsdynamik ist asymmetrisch, mit weitaus höheren Beträgen im unteren Bereich des zentralen Lobus, der den sehr trägen südlichen Lobus (unter 10 cm/a) verdrängt. Der südliche Wurzelbereich ist in seinem unteren, weitaus stärker strukturierten Teil ähnlich träge wie der unstrukturierte nördliche Wurzelbereich des Blockgletschers. Im Längsschnitt ist die Grenze zwischen marginalen Bewegungsbeträgen unter 10 cm/a und dem dynamischen Bereichen des Blockgletschers ziemlich genau mit dem Ansatz der nördlichen, dem Blockgletscher aufsitzenden Mörane gleichzusetzen (ca. 2680 m).

Periode 2, 1991-1997: Diese Periode beinhaltet große Veränderungen im Verhalten des Blockgletschers, die Stirn schob sich um mehr als 65 m (Horizontaldistanz) talabwärts. Das Bewegungsverhalten ist im oberen Bereich ähnlich der Vorperiode (Beträge, horizontale Verteilung), der Höhenbereich um 2650 m stellt den oberen Rand der deutlich höheren Aktivität dar. Der nördliche Lobus verhält sich ähnlich aktiv wie der zentrale (Raten über 180 cm/a), er besitzt aber im Gegensatz zum zentralen Lobus eine scharfe Aktivitätsgrenze (ca. 2640 m). Im zentralen Lobus nehmen die Bewegungsraten über einen weiten Bereich konstant zu.

Periode 3, 1997-1998: In diesem Beobachtungszeitraum nehmen die Bewegungsraten in den Wurzelbereichen oberhalb von 2680 m ab. Das Verhalten der beiden Loben ist ähnlich der Vorperiode, nur sind die Bewegungsraten noch größer: der nördliche Lobus zeichnet sich wieder durch eine scharfe Aktivitätsgrenze aus, während der zentrale eine stete Zunahme der Raten zeigt. Die höchsten Raten werden an der Geländekante mit über 250 cm/a im zentralen und noch um 200 cm/a im nördlichen Lobus gemessen. Auffallend ist weiters das Auftreten zweier Querrinnen am nördlichen Lobus, die in der Aufnahme von 1997 noch nicht sichtbar sind. Im Folgejahr 1999 erscheinen sie noch weiter ausgeprägt.

Fließbewegungsbeträge (Grenzlinie = Linie gleicher Bewegungsgeschwindigkeit = Isotache):

20 cm Bewegungsbetrag/Jahr: Diese Grenzlinie befindet sich in der Periode 1 im Zentralbereich in etwa auf 2670 m, im nördlichen reicht sie bis auf 2650 m. In der nächsten Periode bleibt das Verhalten im Zentralbereich

gleich, um die Furche zwischen den beiden Loben aber steigt die Grenzlinie um 25 m nach oben. In der dritten Periode pendeln sich die Beträge wieder auf das Niveau des ersten Beobachtungszeitraumes ein.

40 cm Bewegungsbetrag/Jahr: Nördlicher Bereich (3-5 m Fallen) homogener als Zentralbereich (7-10 m Fallen), insgesamt ein Fallen dieser Linie im gesamten Zeitraum mit stärkster Tendenz im Bereich der nördlichen Moräne.

60 cm Bewegungsbetrag/Jahr: Nördlicher Bereich kleine Unterschiede (5-7 m Ansteigen), im Zentralbereich gleichbleibende Lage der Linie über den gesamten Zeitraum.

80 cm Bewegungsbetrag/Jahr: Von der ersten auf die zweite Periode starkes Ansteigen sowohl im nördlichen Bereich (20-25 m) als auch im Zentralbereich (15-20 m), Stagnation der Höhenlage der Linie in der Periode 2.

7.2.2. Vertikalbewegungen (Höhenänderung der Blockgletscheroberfläche)

Im Zeitraum 1974-1998 sinkt der Blockgletscher oberhalb der Geländekante im gesamten Bereich ein, besonders der Bereich vor der Kante ist durch auffallenden Mächtigkeitsverlust gekennzeichnet (vgl. Abb. 20). Die Massenbilanz ist mit über -45.000 m^3 signifikant negativ (mehr bei KAUFMANN & LADSTÄDTER 2003), der Blockgletscher ist demnach durch seine Bewegung nicht nur ausgedünnt, sondern hat auch an Substanz verloren. Der durchschnittliche, jährliche Einsinkbetrag beträgt 1,2 cm und ist durch Eisabschmelzen zu erklären.

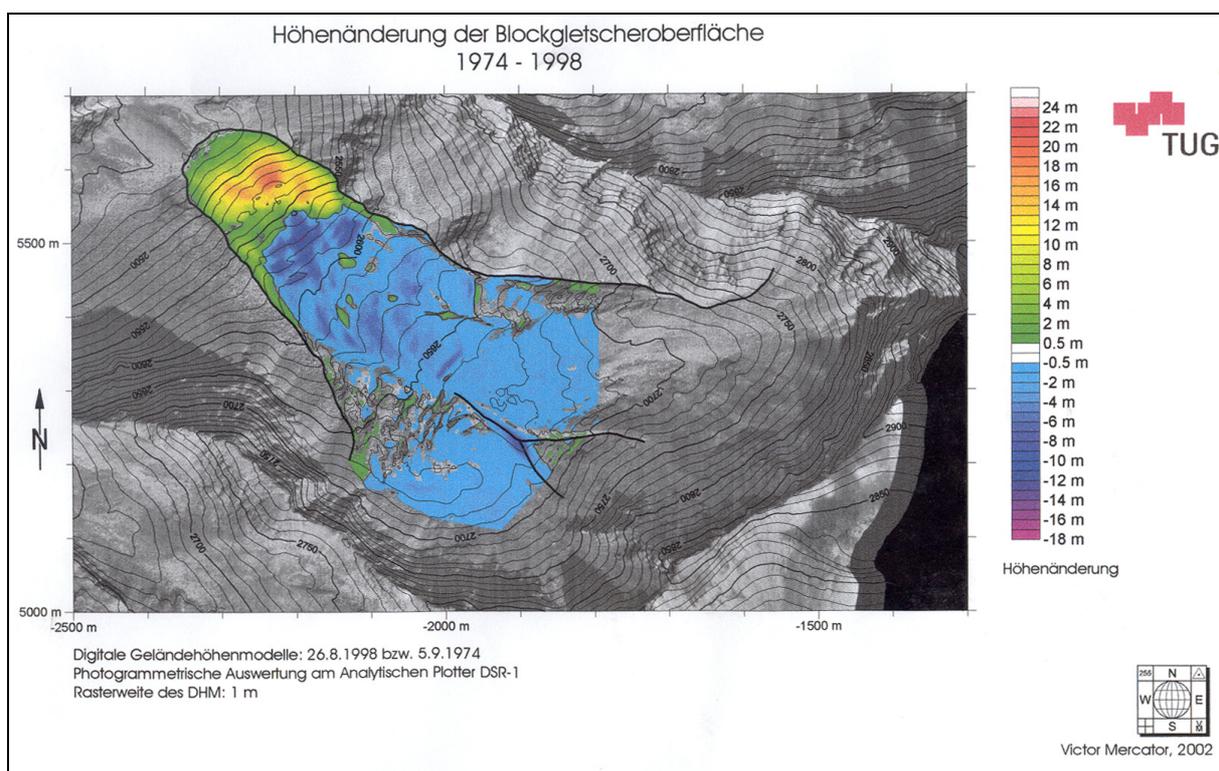


Abb. 20: Höhenänderung der Oberfläche des Blockgletschers Hinteres Langtalkar 1974-1998

In der photogrammetrischen Analyse ist auch ein Absinken der Wurzelzonen zu bemerken. Aus dem Orthophoto des Jahres 1969 können noch Flächen als Reste der Karvergletscherung interpretiert werden, die 1974 schon fast gänzlich verschwunden sind. Die Depression kann einerseits als Resultat der Abschmelzung des Kargletschers gesehen werden, aber auch ein Abreißen des Blockgletschers von seiner Wurzelzone ist durchaus wahrscheinlich. Die Beantwortung dieser Frage benötigt aber noch dezidierte Studien und ist aus der derzeitigen Datenlage nicht zu beantworten. Um räumlich/zeitliche Variabilitäten noch besser veranschaulichen zu können, wurden drei Längsprofile und zwei Querprofile generiert (vgl. Abb. 21). Das Längsprofil von 1974 konnte nicht in allen Profilbereichen in der gesamten Länge von 1998 berechnet werden.

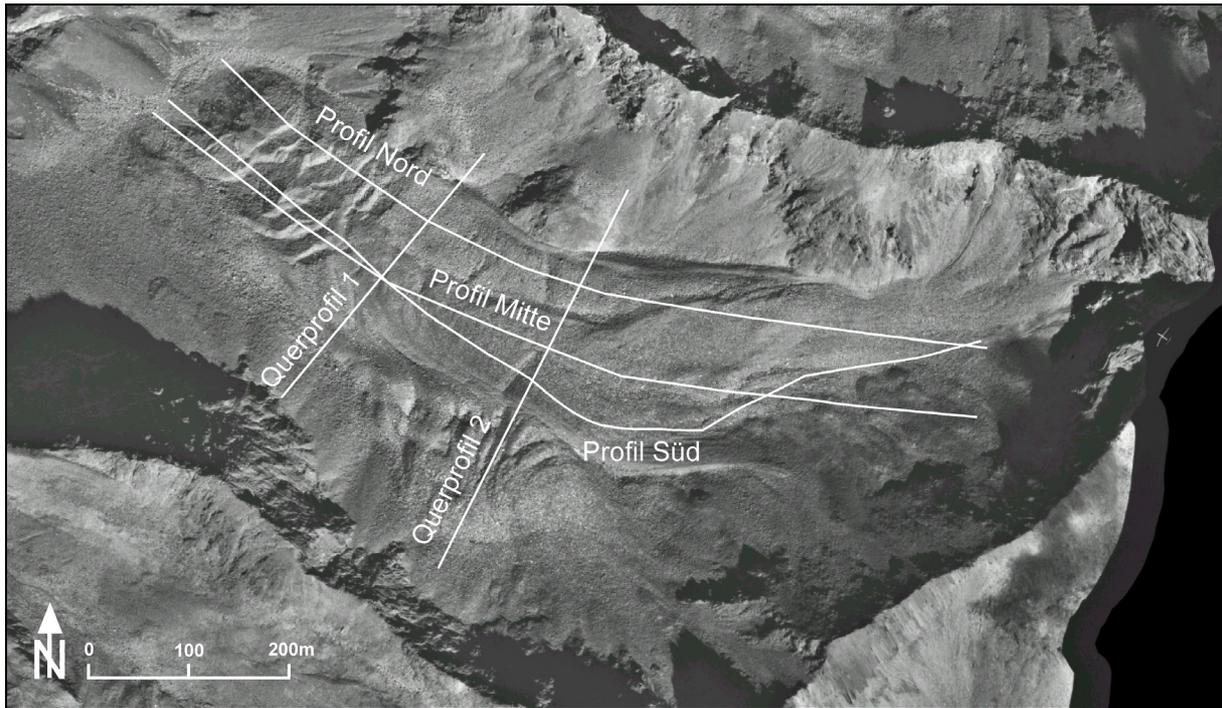


Abb. 21: Lage der Profile (Orthophoto 1998)

Das Profil Nord (Abb. 22) veranschaulicht die Variabilität der Oberfläche des nördlichen Lobus. Klar zu erkennen sind die minimalen Einsinkbeträge oberhalb der Furche, die zunehmenden Einsinkbeträge unterhalb der Furche, die deutliche Abbruchstelle mit Materialverlagerung und die anschließenden Akkumulationsbereiche.

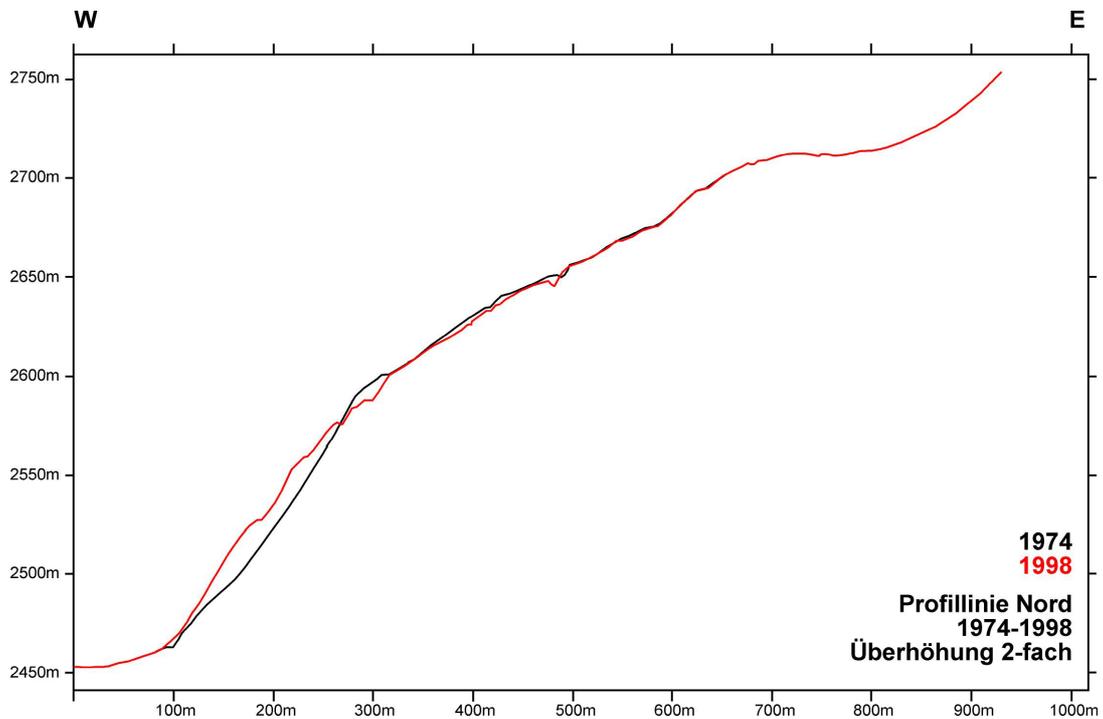


Abb. 22: Profillinie Nord 1974-1998

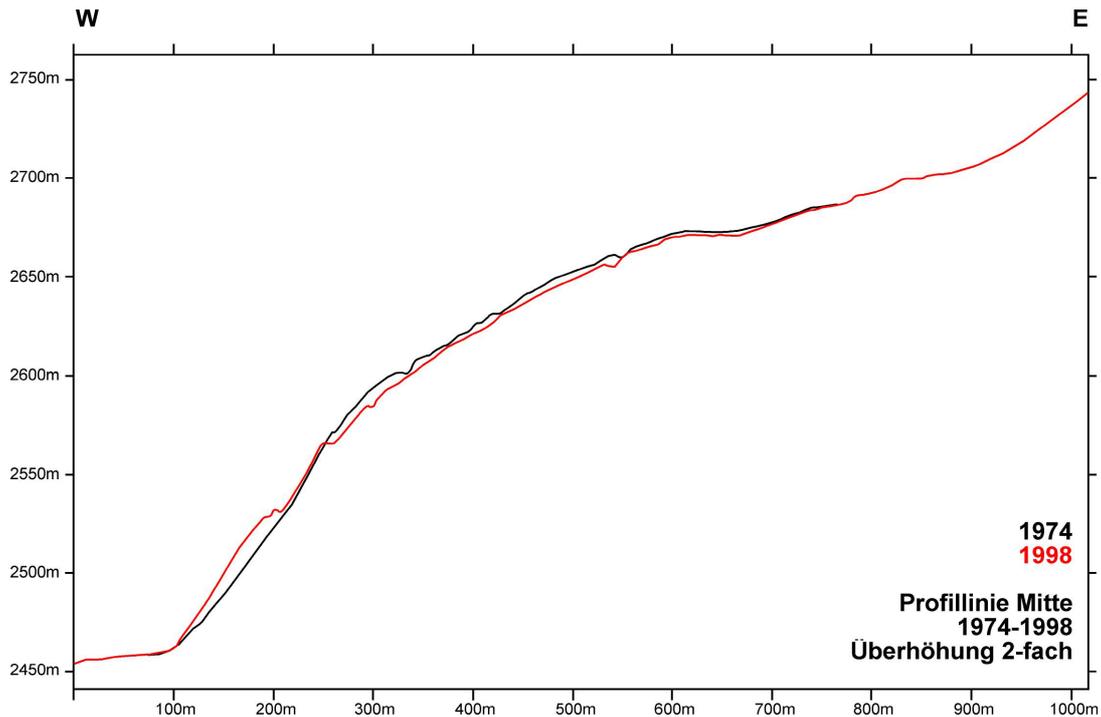


Abb. 23: Profillinie Mitte 1974-1998

Im Profilbereich Mitte (Abb. 23) nehmen die Einsinkbeträge talabwärts konstant zu, der Abbruchbereich ist ebenfalls gut abgrenzbar. In diesem Bereich ist aber der Transportbereich, wo sehr wenig Material liegen blieb, wesentlich länger und der Akkumulationsbereich wesentlich kürzer. Im Profil Süd (Abb. 24) ist die Depression im Wurzelbereich des Blockgletschers sehr gut sichtbar, ebenso die konstant zunehmenden Einsinkbeträge talabwärts. Ebenfalls erkennbar (wie auch in allen anderen Profilen) sind die durch die Zunahme der Hangneigung entstandenen, typischen Abtreppungen (Schuppungen) im Abbruch.

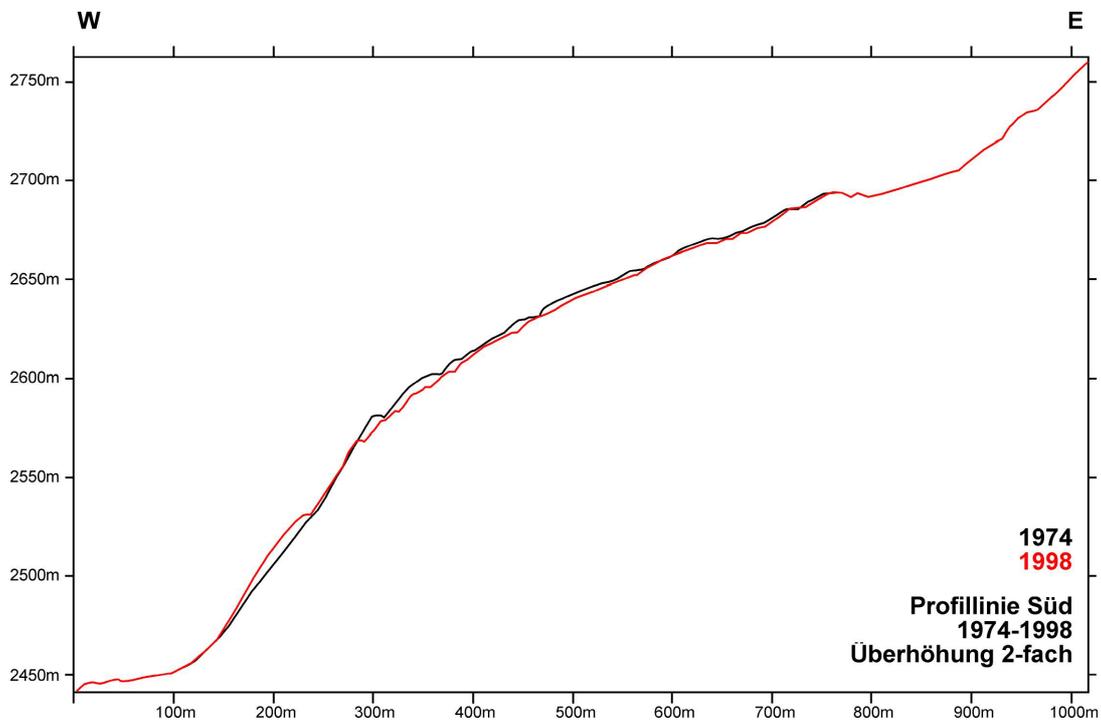


Abb. 24: Profillinie Süd 1974-1998

Das Querprofil 1 (Abb. 25) zeigt den unteren Bereich des Blockgletschers, kurz oberhalb der Geländekante. Deutlich zu erkennen ist die Asymmetrie des Massenverlusts, der nördliche Lobus bleibt im Untersuchungszeitraum annähernd gleich, während der zentrale Lobus besonders durch Abgleiten sehr stark an Substanz verliert.

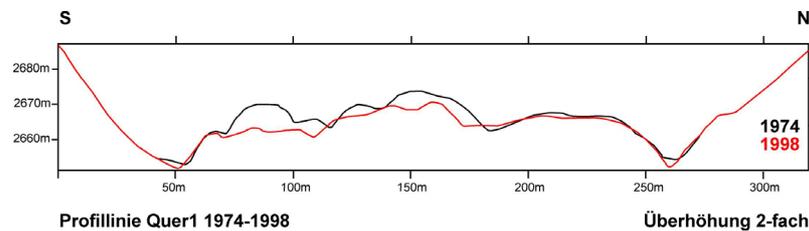


Abb. 25: Querprofil 1 1974-1998

Das Querprofil 2 (Abb. 26) durchschneidet den Blockgletscher unterhalb der Ufermoräne am Beginn des dynamischen Bereichs. Hier ist der Massenverlust wesentlich geringer, nur im rechten Bereich des zentralen Lobus ist ein deutlicheres Einsinken zu bemerken. Die Höhenverluste in den Senken sind durch zahlreiche Schneeflächen im Jahr 1974 zu erklären, 1998 ist das Gelände schneefrei.

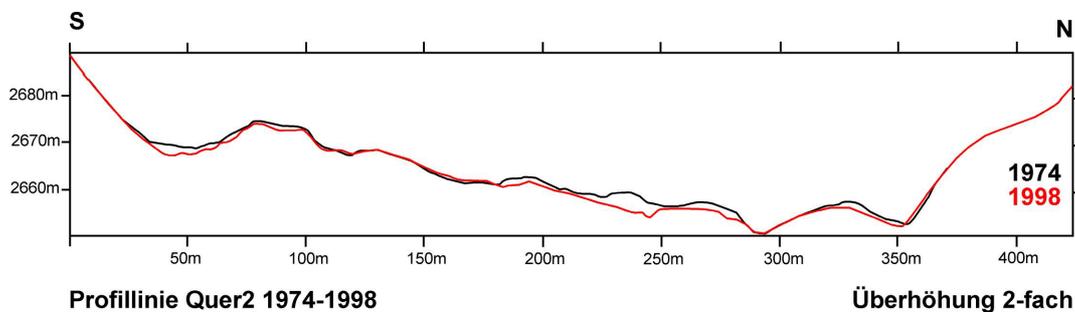


Abb. 26: Querprofil 2 1974-1998

7.2.3. Überblick über die Bewegungsdynamik

Der Blockgletscher Hinteres Langtalkar kann ungeachtet der starken Zunahme seiner Dynamik zwischen 1991 und 1997 in deutlich abgrenzbare Bereiche unterteilt werden (vgl. Abb. 27). Die Bewegungsbeträge zeigen, dass der Blockgletscher aus fünf unterschiedlichen Zonen besteht, deren Verhalten sehr stark divergiert.

Bereich 1: nördlicher, orographisch rechter Lobus (2590-2680 m):

- Deutlich träges Verhalten bis 1991.
- Ab 1991 sprunghafter Anstieg der Bewegungsbeträge (bis 200 cm/a), 1997/98 reichen große Bewegungsraten (-140 cm/a) bis in höhere Zonen des Lobus als im Bereich 2.
- Sehr deutliche Aktivitätsgrenze (ca. 2640 m), Auftreten einer sehr ausgeprägten Querfurche seit 1991, eine zweite Furche ist seit 1974 wenige Dutzend Meter aufwärts zu beobachten. Beide Furchen vergrößern sich seit 1991 beständig.

Bereich 2: zentraler Lobus (2590-2575 m):

- Stark anhaltende Dynamik über den gesamten Beobachtungszeitraum. Sie reicht bis zur nördlichen Ufermoräne und nimmt zum angrenzenden Bereich 3 stark ab.
- Maximale jährliche Bewegungsraten mit über 270 cm/a (1997-1998) an der ausgeprägten Geländekante, kontinuierliche Abnahme der Bewegungsbeträge in Richtung Wurzelzone.
- Deutliche Verstärkung einer schon 1969 vorhandenen Furche unterm Moränenwulst bis 1998, die sich an der Aktivitätsgrenze ausgebildet hat, deutlicheres Einsinken der Oberfläche unterhalb der Furche.

Bereich 3: südlicher, orographisch linker Teil (2590-2690 m):

- Trägerster Bereich des Blockgletschers, marginale Bewegungsraten, durch Bereich 2 in seiner Bewegungsrichtung und -dynamik eingeschränkt.
- Trotz der fehlenden Dynamik sehr ausgeprägte Struktur, wahrscheinlich verschiedene Generationen älterer Aktivitätsphasen.

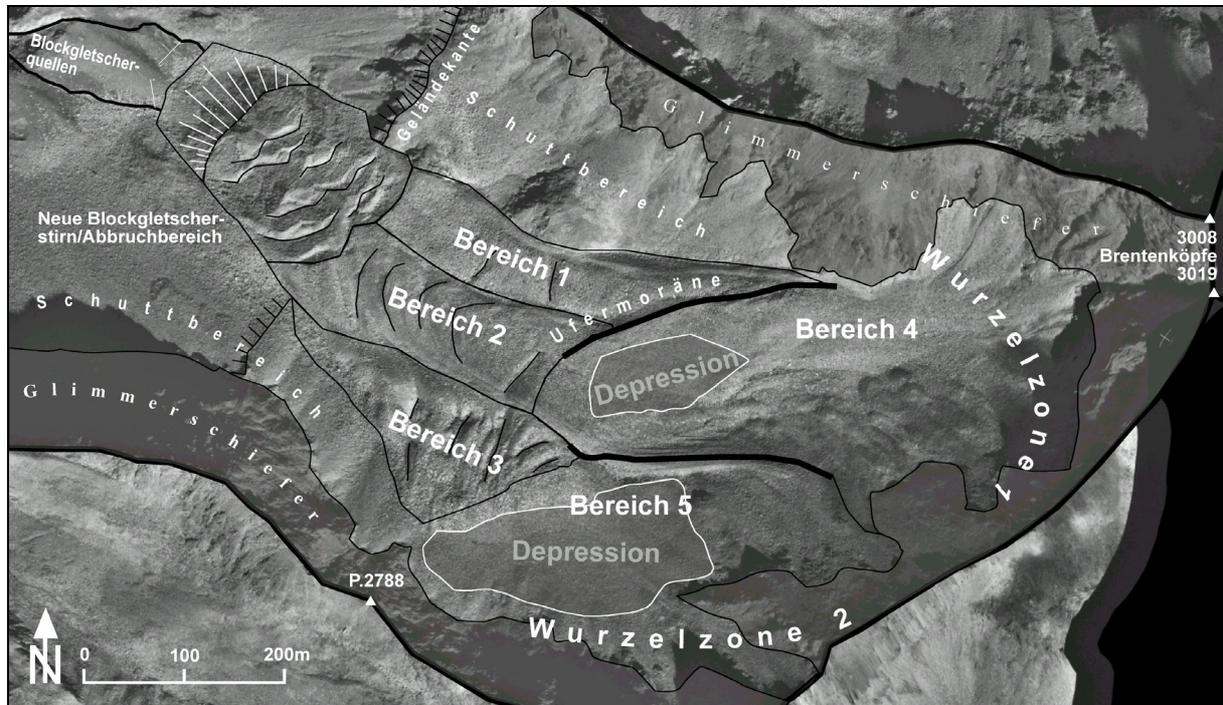


Abb. 27: Differenzierung des Blockgletschers (Basis Orthophoto 1998)

Bereich 4: Bereich des Kargletschers von 1850, nördliche Wurzelzone:

- Die auffallende Ufermoräne am oberen Teil des Blockgletschers ist in allen Bewegungsanalysen eine Dynamikgrenze.
- Im Bereich des Kargletschers treten nur geringe Bewegungsbeträge auf (unter 15cm/a), er ist außerdem durch eine ausgeprägte, kleinräumige Depression gekennzeichnet.

Bereich 5: südliche Wurzelzone:

- sehr geringe Bewegungsbeträge
- ausgeprägte Depression

„Neue“ Blockgletscherstirn (2480-2590 m):

- Im Zeitraum 1991-1997 wandelt sich das Erscheinungsbild des Blockgletschers grundlegend: die ursprünglich wenig gegliederte Stirnhalde gliedert sich aufgrund der verstärkten Bewegungsdynamik in Wülste und Furchen als Ausdruck regelrechter Auflösungserscheinungen. Erste Anzeichen einer Mobilisierung werden an frischen Schuttflächen im September 1994 sichtbar (LIEB, mündl. Mitteilung).
- Die Gründe für dieses erstaunliche Ereignis sind nicht geklärt, meteorologische bzw. hydrologische Extremereignisse (vgl. ELCONIN und LACHAPPELLE 1997) als auch statische Aspekte (Überschreiten von Grenzzugspannungen) sind möglich.

Auffallend ist weiters die Tatsache, dass sich die Bewegungsdynamik des Blockgletschers unterhalb des ehemaligen Kargletschers deutlich erhöht. In diesem Übergangsbereich entstehen auch die ausgeprägten Querrfurchen (vgl. Abb. 28). Die Ergebnisse aus der Bewegungsanalyse unterstützen die geschilderte, aus der Oberflächenmorphologie ableitbare Unterteilung des Blockgletschers und machen deutlich, dass die Teilbereiche des Blockgletschers unterschiedlichste Bewegungstendenzen aufweisen und voneinander durch markante Bewegungsgrenzen getrennt sind. Die einzelnen Teile des Blockgletschers können somit als voneinander relativ unabhängig angesehen werden.

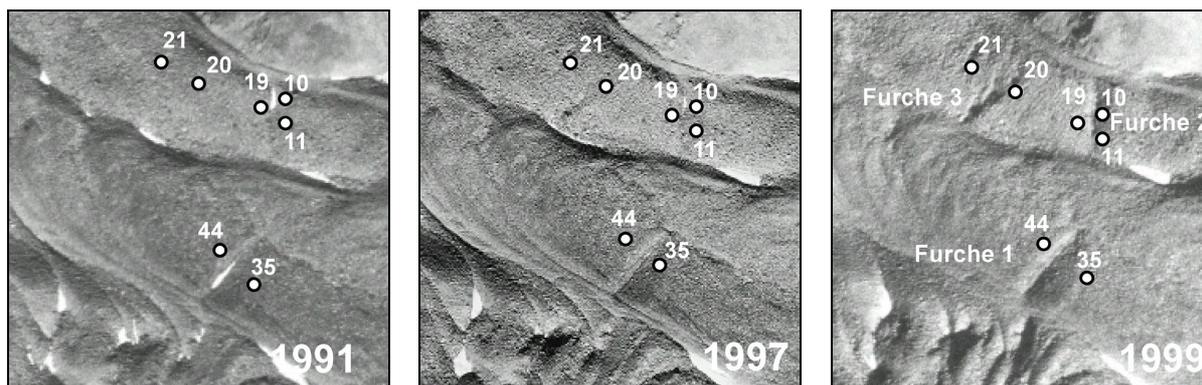


Abb. 28: Oberflächendynamik 1991-1999, ausgeprägte Querfurchen

Das Auftreten der Furche 2 im Bereich 1 (geodätische Beobachtungspunkte 10, 11, 19) ist schon angesprochen worden, interessant ist auch die weiter unten liegende Furche 3 (Punkte 20, 21), die mit der auffallenden Aktivitätsgrenze im Bereich 1 zusammenfällt. Bis 1999 ist ein stetes Wachsen beider Furchen zu erkennen, bzw. öffnet sich 25 m tiefer ein weiterer Spalt. Die Bewegungsbeträge sind in den nur ca. 32 m (Horizontaldistanz) entfernten Punkten fast doppelt so hoch:

	Wirklicher Bewegungsbetrag	
	1999/2000	2000/2001
Furche 1		
Punkt 35	0,243 m/a	0,262 m/a
Punkt 44	0,388 m/a	0,410 m/a
Furche 2		
Punkt 10	0,127 m/a	0,165 m/a
Punkt 11	0,151 m/a	0,182 m/a
Punkt 19	0,322 m/a	0,347 m/a
Furche 3		
Punkt 20	0,524 m/a	0,600 m/a
Punkt 21	1,101 m/a	1,158 m/a

Tab. 4: Bewegungsbeträge ausgewählter geodätischer Beobachtungspunkte

Die ältere Furche 1 ist schon 1969 zu erkennen und beschreibt den Übergang vom trägen Karbereich in den dynamischen Bereich des Blockgletschers. Auch hier lassen sich deutliche Bewegungsunterschiede erkennen.

7.3. Literatur

- BARSCH, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer Series in Physical Environment 16, Springer Verlag, 335 S.
- ELCONIN, R.F. & LACHAPPELLE, E.R., 1997: Flow and internal structure of a rock glacier. *Journal of Glaciology* 43 (144), 238-244.
- HAEBERLI, W., 1985: Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of Alpine rock glaciers. Technical Report 77, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- HUMLUM, O., 1996: Origin of Rock Glaciers: Observations from Mellemfjord, Disko Island, Central West Greenland. *Permafrost and Periglacial Processes* 7, 361-380.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER R. 2003: Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: two case studies in the Austrian Alps. *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland*, 525-530.
- KRAINER, K. & MOSTLER, W., 2000: Reichenkar rock glacier: a glacier derived debris-ice system in the western Stubai Alps, Austria. *Permafrost and Periglacial Processes* 11, 267-275.
- KRAINER, K. & MOSTLER, W., 2001: Der aktive Blockgletscher im Hinteren Langtalkar Gößnitztal, Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern, Band 6*, 139-168.
- LIEB, G. K., 1987: Die Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe und ihre Entwicklung seit dem Spätglazial. Unveröffentlichte Dissertation, Graz, 286 S.

8. Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten)

L.W. KENYI und V. KAUFMANN

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Detektion und messtechnische Erfassung der Gletscherbewegung (Oberflächendeformation) der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten) mittels satellitengestützter (ERS-1/2) differentieller SAR-Interferometrie (DINSAR) besprochen. In der vorliegenden Studie standen nur SAR-Bilddaten von Sommermonaten und keine Winteraufnahmen zur Verfügung. Eines von drei vorhandenen Bildpaaren der ERS Tandem-Mission wies für den Zungenbereich der Pasterze genügend Kohärenz auf, um daraus ein aussagekräftiges Interferogramm ableiten zu können. Für den eintägigen Beobachtungszeitraum im August 1995 wurden maximale Oberflächenverschiebungen von 30-40 mm/Tag in SAR-Blickrichtung festgestellt. Ausgehend von diesem Messergebnis wurde unter vereinfachten Annahmen, wie z.B. oberflächenparalleles Fließen und über das Jahr gleichbleibende Fließgeschwindigkeit, eine mittlere jährliche Fließgeschwindigkeit der Pasterzen-Zunge von max. 40-50 m/Jahr abgeschätzt.

8.1. Einleitung

Die Erfassung der Eisdickenänderung und der Fließgeschwindigkeit von Gletschern ist für viele glaziologische Fragestellungen (Massenbilanz, dreidimensionale Modellierung, etc.) von großer Bedeutung (KÄÄB 1996, VISCHER 1997, OERLEMANS 2001). Eisdickenänderung kann mit Hilfe von *Airborne Laserscanning (ALS)* effizient und kostengünstig bestimmt werden (GEIST & STÖTTER 2002). Für die großräumige, flächendeckende Erfassung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern – alpine Talgletscher mögen hier im Mittelpunkt stehen – eignen sich im besonderem Maße ebenfalls Fernerkundungsmethoden, wie z.B. die Luftbildphotogrammetrie oder die bildgebende Radar-Technik. In diesem Beitrag sollen die Möglichkeiten der satellitengestützten Radar-Interferometrie unter Verwendung von ERS-1/2 SAR-Bilddaten am Beispiel des größten Gletschers Österreichs, der Pasterze, aufgezeigt werden.

Der Einsatz der differentiellen SAR-Interferometrie (DINSAR) in der Gletscherbeobachtung ist in der Literatur umfassend dokumentiert (KWOK & FAHNESTOCK 1996, JOUGHIN et al. 1998, MATTAR et al. 1998, MOHR et al. 2003, REEH et al. 2003). Einen kompakten Überblick über die Methodenvielfalt gibt u.a. SHAROV 2005.

Im Kap. 5 wurde bereits festgehalten, dass eine statistisch signifikante Bewegungsmessung von sich langsam bewegenden Gletschern bzw. Blockgletschern – bei einer mittleren jährlichen Horizontalbewegung von weniger als 6,6 m/Jahr unter Annahme ebenen Geländes – aus ERS-1/2 SAR-Bilddaten der Tandem-Mission nicht möglich ist. Die kleinen Kargletscher der Schobergruppe zeigen eine Bewegungsdynamik mit sicherlich weniger als 6,6 m Jahresbewegung. Für das Gössnitzkees, dem mit 75 ha (Stand 1997) größten Gletscher der Schobergruppe, wurden beispielsweise in den 90er-Jahren horizontale Bewegungsraten von max. 0,4-0,5 m/Jahr gemessen. Eintägige ERS-1/2 Interferogramme scheiden daher für eine Bewegungsmessung von Gletschern in der Schobergruppe aus.

Da Gletscheroberflächen i.a. schon nach wenigen Tagen völlig dekorrelierte SAR-Signale liefern (vgl. dazu auch ROTT & SIEGEL 1997 und NAGLER et al. 2002) kann eine Bewegungsdetektion bzw. -messung aus zeitlich länger, z.B. 35 Tage, auseinander liegenden SAR-Bilddaten mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erfolgreich durchgeführt werden. Einjährige SAR-Interferogramme sind in jedem Fall für Geschwindigkeitsmessungen ungeeignet. Um dennoch dem Thema des gegenständlichen Projekts gerecht zu werden, wurde nach größeren und daher schneller fließenden Gletschern im Nahbereich der Schobergruppe gesucht. Das *Untersulzbachkees* (Venedigergruppe) und die *Pasterze* (Glocknergruppe) zeigten wider Erwarten in einem der drei eintägigen SAR-Interferogramme hohe Kohärenz. Beide Gletscher liegen im Nationalpark Hohe Tauern und sind im Radarbild gut identifizierbar (siehe Abb. 31).

ROTT & SIEGEL 1997, NAGLER et al. 2002 sowie GUTJAHR et al. 2004 berichten über die erfolgreiche Anwendung der DINSAR-Methode am Hintereisferner (Öztaler Alpen). Die genannten Autoren weisen aber auch auf Schwierigkeiten und Einschränkungen von DINSAR – ERS-1/2 SAR-Bilddaten wurden ausgewertet – im Hochgebirge hin. Es kamen nur Winteraufnahmen zur Auswertung. Der Hintereisferner ist für das gegenständliche Projekt u.a. auch deshalb sehr interessant, da er morphologisch der Pasterze sehr ähnlich ist.

Beim Hintereisferner wurden in optimaler Weise ERS-1/2 SAR-Bilder von *ascending* Orbits ausgewertet; beim gegenständlichen Projekt der Pasterze standen jedoch nur die für eine Bewegungsmessung geometrisch ungünstigeren Radarbilder von *descending* Orbits zur Verfügung.

8.2. Die Pasterze

Die Pasterze ist mit 8,4 km Gesamtlänge und 18,5 km² Fläche (Stand 2002) nicht nur der größte Gletscher Österreichs, sondern auch der Ostalpen (LIEB & SLUPETZKY 2004). Seine Gletscherzunge ist ca. 4 km lang (vgl. Kap. 5, Abb. 14 und in diesem Kapitel, Abb. 31 und Abb. 34).

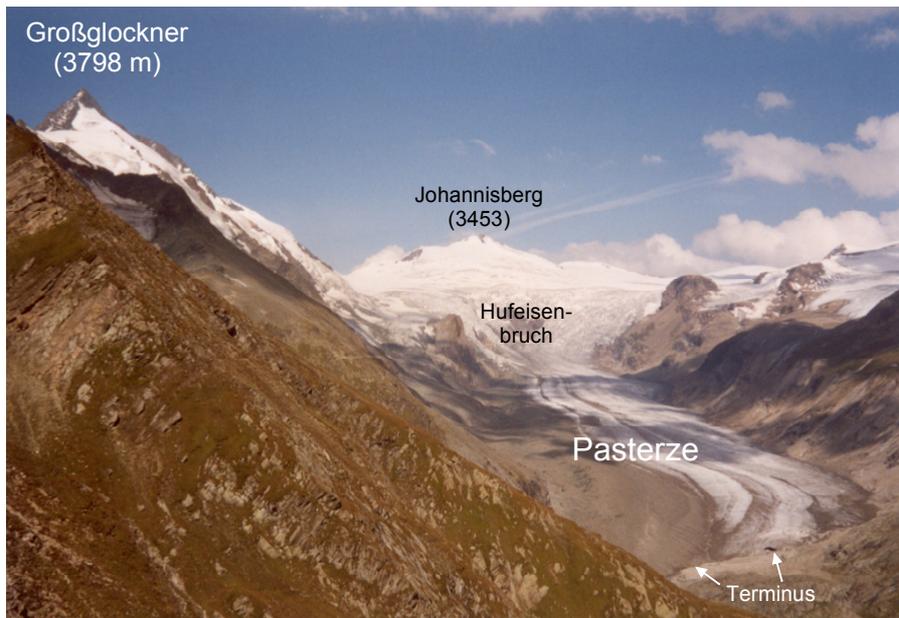


Abb. 29: Blick von der Stockerscharte (Wiener Höhenweg, 2442 m) nach NW zur Pasterze. (Photo: V. KAUFMANN, 31.8.2002).

Im Rahmen dieser Studie soll die Kinematik der 4-6° flachen Pasterzen-Zunge, welche sich am Fuße des Großglockners unterhalb des Hufeisenbruchs talwärts bewegt (siehe Abb. 29), aus den im Kap. 5, Tab. 2 aufgelisteten ERS-1/2 SAR-Bilddaten abgeleitet werden. Besonders charakteristisch für die Gletscherzunge ist ihre Schuttbedeckung im rechten Teil. Hier ist im Gegensatz zum schutfreien linken Teil die jährliche Ablation geringer. Dies bedingt eine geringfügig größere Gletschermächtigkeit in diesem Bereich und in weiterer Folge eine etwas längere Gletscherzunge im rechten Teilbereich. Da die beiden Teilbereiche sowohl im Spektrum des sichtbaren Lichts als auch im Mikrowellen-Bereich unterschiedliches Reflexionsverhalten aufweisen, können diese sehr gut in den entsprechenden Fernerkundungsbildern abgegrenzt werden (vgl. Abb. 29, Abb. 34 und Abb. 36).

Besonders beachtenswert ist die nunmehr 125 Jahre lang währende jährliche Gletschervermessung (1879-2004) auf der Pasterze (LIEB 2004b). Seit 1958 werden die jährlichen Gletschermessungen vom Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz im Auftrag des Österreichischen Alpenvereins durchgeführt (WAKONIGG & LIEB 1996, LIEB 2005). Neben den einfachen, traditionellen Messmethoden kamen in jüngerer Zeit auch modernere Beobachtungsmethoden wie z.B. GPS zum Einsatz. Die Auswertergebnisse werden alljährlich in den Mitteilungen des Österreichischen Alpenvereins publiziert (vgl. PATZELT 1996 und 2005).

An fix vorgegebenen Messprofilen (vgl. Abb. 30) werden alljährlich die Fließbewegung sowie die Höhenänderung der Gletscheroberfläche ermittelt. Nach LIEB 2004a übersteigen die derzeitigen Bewegungsbeträge an keinem Messpunkte den Wert von 35 m/Jahr. Durch die jährlichen Gletschermessungen ist der allgemeine Trend des Gletscherrückgangs in den Alpen sehr gut dokumentiert. Im heißen Sommer 2002/2003 sank die Oberfläche der gesamten Gletscherzunge im Mittel um ca. 6,59 m ein, für den Vergleichszeitraum 1994-2003 wurde ein Wert von 4,24 m ermittelt (LIEB 2004a).

Im folgenden wird nun am Beispiel der Pasterze in kurzen Worten auf die interferometrische Prozessierung der ERS-1/2 SAR-Bilddaten eingegangen.

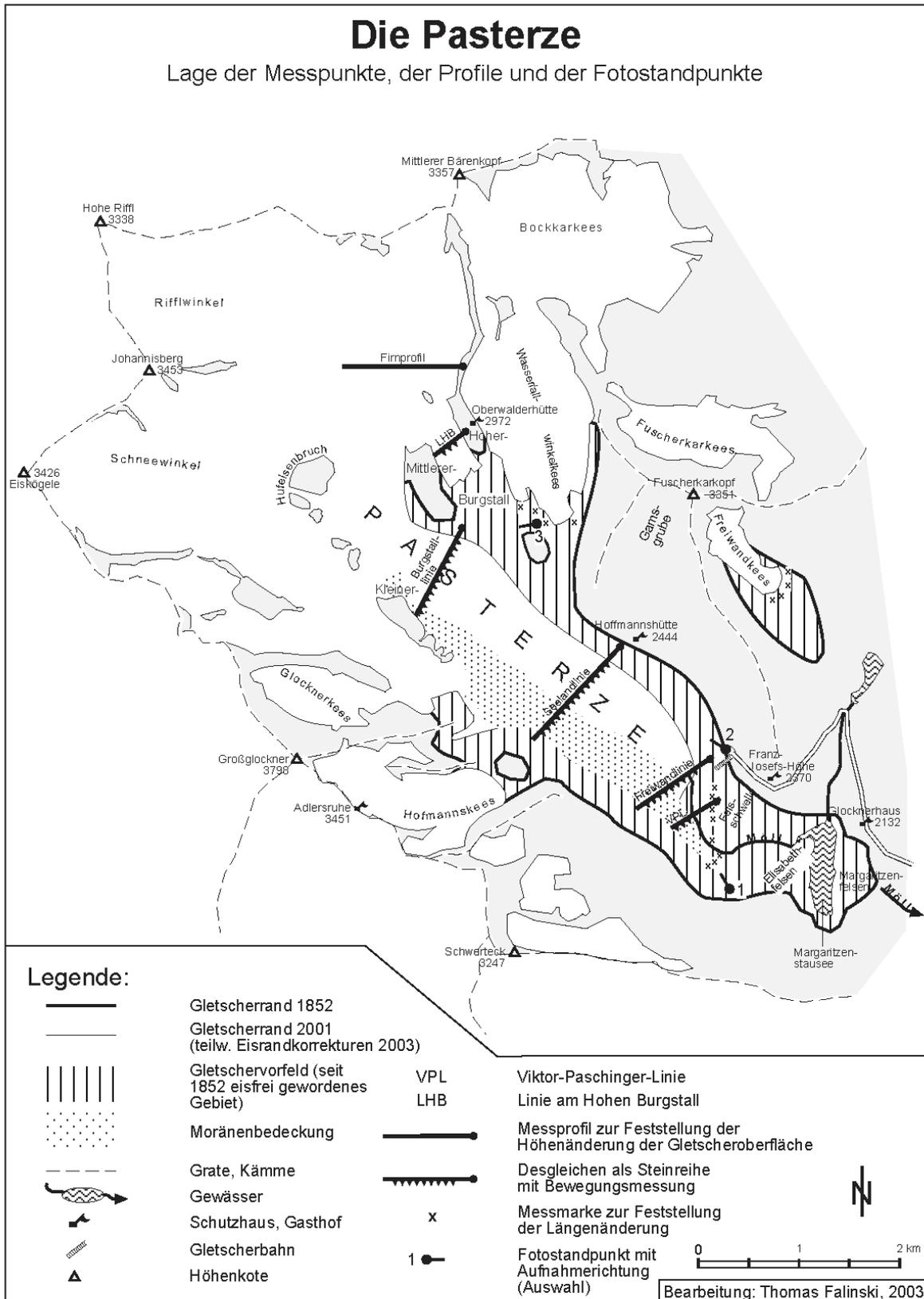


Abb. 30: Situationsdarstellung der Pasterze mit Hinweisen zur Gletschervermessung. Darstellung unverändert übernommen aus http://www.uni-graz.at/geowww/pasterze/homepage/anderes/Pas_karte.pdf (Zugriff am 23.6.2005).

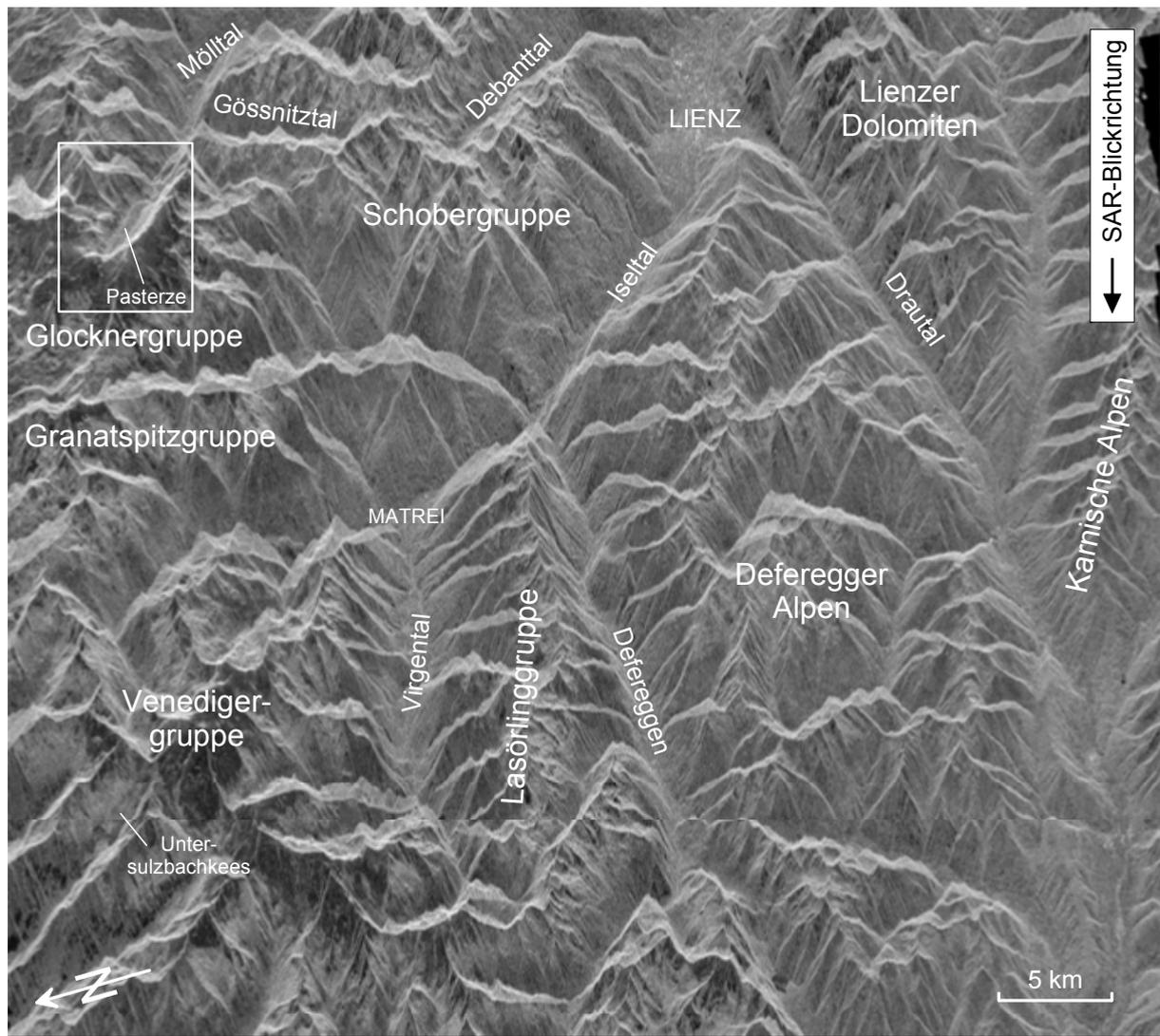


Abb. 31: ERS SAR-Amplitudenbild (ca. 50 km × 50 km, SAR-Viertelszene, Schrägdistanzdarstellung) des Orbit-Bildpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). Die Amplitude des rückgestreuten Radarechos ist als Grauton dargestellt. Um einen orthoskopischen Raumeindruck des aufgenommenen Geländes zu erhalten, muss bei der Bildbetrachtung die SAR-Blickrichtung stets zum Betrachter orientiert sein. Das Studiengebiet mit der Pasterze ist mit einem weißen Rahmen gekennzeichnet.

8.3. DINSAR-Prozessierung

Da die Datengrundlage (= ERS-1/2 SAR Bilddaten) die selbe ist, wie sie im Kap. 5 schon beschrieben wurde, können die dort berechneten Interferogramme unmittelbar für eine erste Interpretation herangezogen werden. Das Studiengebiet der Pasterze ist in Abb. 31 graphisch ausgewiesen. Abb. 32 zeigt diesen Bildausschnitt im Detail. Von den in Kap. 5, Tab. 2 angeführten interferometrischen Bildpaaren zeigt nur jenes vom 20./21.8.1995 (Tandem-Mission) ausreichende Szenenkohärenz, und zwar nur für die unterhalb des Hufeisenbruchs gelegene Gletscherzunge. Da die vorliegenden SAR-Bilddaten von *descending* Orbits aufgenommen wurden, sind die Geländebereiche Hufeisenbruch, Pasterzenboden (= Nährgebiet der Pasterze) und Ostseite des Kammverlaufs Eiskögele, Großglockner, Schwerteck aufgrund der für Radar typischen Abbildungsgeometrie im Bild sehr stark verkürzt bzw. „umgeklappt“. Durch Mehrfachüberlagerungen (*Layover*) von SAR-Signalen sind auch die äußersten Bereiche der Gletscherzunge auf der schuttbedeckten rechten Seite betroffen. Die von *Layover*-Effekten beeinflussten Geländebereiche sind für eine interferometrische Auswertung ungeeignet (vgl. dazu auch Abb. 37). ERS SAR-Bilddaten von *ascending* Orbits wären für ein Pasterzen-Monitoring besser geeignet.

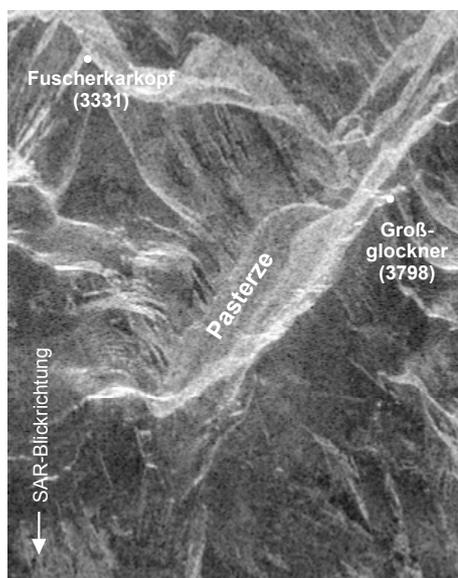


Abb. 32: Das Studiengebiet mit der Pasterze im ERS SAR-Amplitudenbild (20.8.1995)-(21.8.1995). Ausschnitt aus Abb. 31.

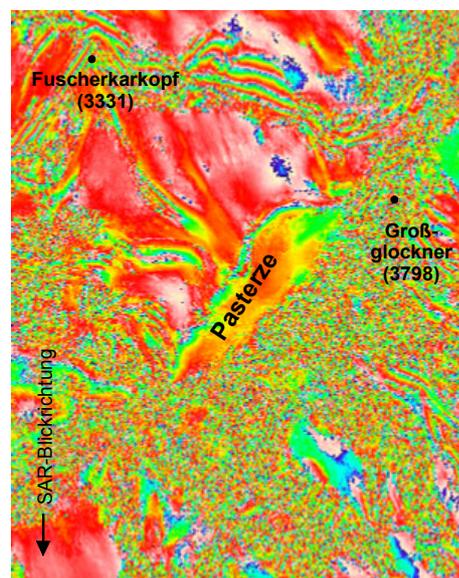


Abb. 33: Differenzielles SAR-Interferogramm für das in Abb. 32 dargestellte Studiengebiet. Die Zeitdifferenz beträgt 1 Tag (= Tandem-Mission). Die Phasenverschiebungen (modulo 2π), welche in SAR-Blickrichtung gemessen wurden, sind farbkodiert dargestellt. Über große Teile der Pasterzen-Zunge ist Szenenkohärenz gegeben. Alle anderen Gletscher im dargestellten Ausschnitt weisen dekorrelierte Phaseninformation auf. Der Bereich oberhalb des Gamsgrubenweges (Franz-Josefs-Höhe – Hoffmannshütte) zeigt Kohärenz.

Die fünf differentiellen SAR-Interferogramme wurden mit Hilfe eines digitalen Geländemodells (Abb. 35) in die Kartengeometrie der Österreichischen Karte 1:50.000 entzerrt. Somit können die einzelnen Interferogramme nicht nur bildpunktweise miteinander, sondern auch mit anderen geokodierten Datensätzen, wie z.B. dem Farbluftbild 1998 (Abb. 34) und dem ERS SAR-Amplitudenbild (Abb. 36), geometrisch verknüpft werden. Für Vergleichszwecke sind nur die eintägigen Interferogramme graphisch dargestellt (Abb. 34 - Abb. 39). Bei den einjährigen Interferogrammen ist nahezu keine Szenenkohärenz mehr gegeben – auf ihre Darstellung wurde daher verzichtet. U.a. können aus den beiden eintägigen Interferogrammen geringer Kohärenz folgende zwei Schlüsse gezogen werden: (1) Die orographisch linke Begrenzung der Gletscherzunge bildet sich in den beiden differentiellen SAR-Interferogrammen verhältnismäßig scharf ab, da die Kohärenz der benachbarten,

unvergletscherten Gebiete wesentlich größer ist als im Vergleich zum Gletscher. D.h. mit anderen Worten, dass damit eine Trennung zwischen Gletscher und nicht vergletschertem Gebiet – zumindest im Zungenbereich – möglich ist. (2) Durch Vergleich mit dem Farbornthophoto konnte weiters festgestellt werden, dass der schuttbedeckte rechte Teil der Gletscherzunge weniger schnell dekorreliert als der angrenzende ausgeaperte Blankeisbereich.

Das farbkodierte differentielle SAR-Interferogramm der Abb. 38 zeigt sehr gut die Oberflächendeformation des schuttbedeckten Gletscherbereichs unterhalb von 2300 m.

8.4. Ergebnis

Durch Anwendung eines *Phase-Unwrapping*-Algorithmus (*Brunch-Cut*-Methode) konnte die Phasenmehrfachdeutigkeit des (relativen) SAR-Interferogramms vom 20./21.8.1995 aufgelöst werden. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass das Berechnen der Phasenambiguitäten für bewegtes Gelände und insbesondere für gebirgige Bereiche ein äußerst schwierig zu lösendes Problem darstellt. Oftmals kann das *Phase Unwrapping* nur für kleine Geländebereiche erfolgreich durchgeführt werden (STROZZI et al. 2003). Durch ungünstige Fehlerfortpflanzung kann es mitunter zu grob falschen Ergebnissen kommen. Einzelne SAR-Interferogramme sind daher stets mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren. Eine gesicherte Interpretation kann i.a. nur durch eine Zeitreihenanalyse von vergleichbaren Interferogrammen ermöglicht werden.

Da die absoluten Phasenwerte i.A. wenig aussagekräftig sind, wurden diese in äquivalente, metrische Verschiebungswerte umgerechnet. Ein Phasenzyklus von 2π entspricht einer Verschiebung der Geländeoberfläche von 28 mm in SAR-Blickrichtung. Eine Kalibrierung der so ermittelten Verschiebungswerte bezüglich eines unbekanntenen Nullpunkts erfolgte über einen stabilen Hangbereich unterhalb des Fuscherkarkopfs. Das Resultat ist ein farbkodiertes Oberflächendeformationsbild (siehe Abb. 40).

In weiterer Folge wurde dieses Resultat geglättet und in zwei thematischen Karten (Abb. 41 und Abb. 42) graphisch dargestellt. Die Abb. 41 zeigt die Oberflächenverschiebung der Pasterze für den eintägigen Zeitraum 20./21.8.1995. Die maximalen Verschiebungswerte in SAR-Blickrichtung liegen bei ca. 40-45 mm/Tag. Für die Ermittlung von dreidimensionalen Verschiebungsvektoren bzw. von Fließgeschwindigkeiten müssen weitere Zusatzinformationen vorhanden sein (JOUGHIN et al. 1998, MOHR et al. 2003). Im Allgemeinen benötigt man mindestens zwei Interferogramme von sich kreuzenden Orbits (= *ascending* und *descending* Orbits) und eine Annahme über das Fließverhalten des Gletschers wie z.B. oberflächenparalleles Fließen, um die drei Komponenten des Verschiebungsvektors berechnen zu können. Im gegenständlichen Fall kann in erster Näherung – die Fließrichtung der Pasterze ist näherungsweise parallel zur SAR-Blickrichtung – auf eine komplementäre SAR-Aufnahmegeometrie verzichtet werden. Somit muss nur noch über eine Zusatzinformation(-bedingung) zur Lösung der dritten Komponente des Bewegungsvektors verfügt werden. Für die Darstellung der Fließgeschwindigkeit in der Abb. 42 wurde oberflächenparalleles Fließen bei einer mit 4° geneigten Geländeoberfläche angenommen. Aus der errechneten Tagesbewegung wurde ein Jahreswert geschätzt, um einen aussagekräftigeren Vergleichswert zu erhalten. Unter den gegebenen Annahmen kann für das Jahr 1995 mit einer horizontalen Fließgeschwindigkeit des Gletschers von höchstens 45-50 m/Jahr unterhalb des Hufeisenbruchs ausgegangen werden.

Diskussion

Die gemessene Verschiebung der Gletscheroberfläche in SAR-Blickrichtung hängt in den Sommermonaten (= Zeit der Eisschmelze) einerseits (1) von der Fließgeschwindigkeit und andererseits (2) von der Intensität der Eisschmelze ab. Strain-Effekte wie z.B. Dehnung und Stauchung seien hier nicht berücksichtigt.

Die durch Eisschmelze verursachte Höhenänderung der Gletscheroberfläche kann – bei ausreichender Kohärenz – eine beträchtliche Phasenänderung verursachen, da bei den ERS-Satelliten aufgrund des steilen Blickwinkels der SAR-Antenne (23° steiler Einfallswinkel der Radarkeule zur Erdoberfläche) die interferometrische Messung besonders empfindlich auf vertikale Höhenänderungen der kohärenten Phasenzentren ist.

Da sich die Auswirkungen von (1) und (2) im Messsignal additiv überlagern, kann aus dem Messwert nicht auf die Einzelbeiträge von (1) und (2) rückgeschlossen werden. Die Fließgeschwindigkeit kann nur dann berechnet werden, wenn die Höhenänderung bekannt ist oder im besten Fall Null ist. Da die Eisdickenänderung eine für kurze Beobachtungsintervalle schwer zu messende Größe darstellt, kann daher i.A. – zumindest für die Sommermonate – die Fließgeschwindigkeit von Gletschern aus SAR-Interferogrammen nicht einfach abgeleitet

werden. Neue Lösungsvorschläge werden bei einem derzeit laufenden EU-Projekt¹¹ durch ein internationales Konsortium von Experten unter der Leitung von Joanneum Research erarbeitet. U.a. wird versucht, die zeitlich variable Ablation durch gleichzeitige Altimetermessungen bzw. durch Laserscanning zu erfassen.

Eine Eisschmelze von 1 cm/Tag verursacht – rein rechnerisch – eine scheinbare Änderung der horizontalen Fließgeschwindigkeit im Endergebnis von ca. 10,3 m/Jahr. Aus der ermittelten Eisdickenänderung der Messprofile für den Beobachtungszeitraum 1994-1995 (PATZELT 1996; LIEB, mündl. Mitteilung) kann eine mittlere tägliche Ablation von max. 2-3 cm geschätzt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Gletscherschmelze im Beobachtungszeitraum 20./21.8.1995 geringer war als der vorhin angegebene Schätzwert, da eine hohe Szenenkohärenz nur bei stabilen Oberflächenverhältnisse, d.h. bei geringer Ablation, möglich ist. Insbesondere führt oberflächliches Schmelzwasser zu verstärkter Dekorrelation der SAR-Signale, was in diesem Beispiel nicht der Fall war. Die geodätischen Messungen 1994-1995 ergaben an der Seelandlinie einen maximalen Bewegungsbetrag von 22,2 m/Jahr und an der Freiwandlinie 5,55 m/Jahr. Bei einem geschätzten Ablationswert von 2 cm/Tag würde das interferometrische Messergebnis mit jenem der traditionellen Vermessung keinen Widerspruch ergeben. Ob eine Extrapolation von einem Tag auf ein Jahr zulässig ist, sei dahingestellt. In den Wintermonaten gibt es keine Ablation und es kann daher bei entsprechend stabilen Oberflächenverhältnissen (kein Neuschnee, kein nasser Schnee, keine Schneedrift) unter den schon angesprochenen Prämissen die Fließgeschwindigkeit ermittelt werden.

Einen weiteren Unsicherheitsfaktor stellt die Genauigkeit des digitalen Geländemodells, welches zur Abschätzung der topographischen Phase benötigt wird, dar. Auf eine nähere Darstellung dieses Sachverhalts wird hier verzichtet und statt dessen auf GUTJAHR et al. 2004 verwiesen.

8.5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Fließgeschwindigkeit von Alpengletschern kann durch interferometrische Analyse von ERS-1/2 SAR-Bilddaten unter bestimmten Voraussetzungen sehr genau und auch flächendeckend gemessen werden. Eine wichtige Voraussetzung ist die Kohärenz der SAR-Signale. Da sich aufgrund der physikalischen Natur des Eises, des Fließvorgangs und der Witterungseinflüsse (Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee) die Oberflächeneigenschaften des Gletschers ständig ändern können, ist die erfolgreiche Anwendung der satellitengestützten Radar-Interferometrie an Voraussetzungen geknüpft. Im gegenständlichen Projekt wurden nur SAR-Szenen der Sommermonate – speziell ausgerichtet auf die Bedürfnisse der Blockgletscherbeobachtung – berücksichtigt. Somit schied schon eine Großzahl von interferometrischen Bildpaaren durch fehlende Szenenkohärenz aus. Unter gewissen Voraussetzungen wie z.B. bei geringer Ablation kann jedoch auch Kohärenz über Blankeis gewahrt bleiben. Aufgrund der schnellen Dekorrelation von Gletscheroberflächen eignen sich prinzipiell nur SAR-Bilddaten der sog. Tandem-Mission, welche in einem Zeitintervall von einem Tag aufgenommen wurden, für die Auswertung. Die physikalisch-geometrische Deutung des interferometrischen Messergebnisses ist – zumindest für Messungen in der Ablationszeit – relativ schwierig, da die Auswirkungen der Eisdickenänderung und der Fließbewegung des Gletschers auf die gemessene Phasendifferenz nicht unabhängig voneinander bestimmt werden können. Aus diesem Grund und auch wegen der höheren Kohärenzwahrscheinlichkeit sollte man nur SAR-Szenen der Wintermonate für eine DINSAR-Analyse heranziehen.

Winteraufnahmen eignen sich jedoch nicht für ein Blockgletscher-Monitoring.

Bei ERS-1/2 erschwert die für Hochgebirgsanwendungen äußerst ungünstige SAR-Geometrie die DINSAR-Auswertung. Im Speziellen stellt das *Phase Unwrapping* eine große rechentechnische Herausforderung dar. Die erfolgreiche Durchführung beschränkt sich oft nur auf kleine Gebiete, um systematische Fehler zu vermeiden.

Hat die Gletscherbeobachtung mittel DINSAR im arktischen Raum nahezu operationellen Charakter erreicht, ist ihre Anwendung in Gebieten mit hoher Reliefenergie, wie z.B. in den Alpen, den Anden oder im Himalaya, nur erschwert durchführbar. Bezüglich des Einsatzes von zukünftigen Satellitenmissionen gilt ähnliches wie bereits in Kap. 5 ausgeführt wurde.

Es muss jedenfalls bei der Bewertung der Anwendbarkeit von ERS-1/2 SAR-Bilddaten im Gletscher-Monitoring berücksichtigt werden, dass der SAR-Sensor eigentlich für ozeanische Anwendungen konzipiert wurde und nicht für Hochgebirgsanwendungen.

¹¹ INTEGRAL (vgl. <http://dib.joanneum.at/integral/>)

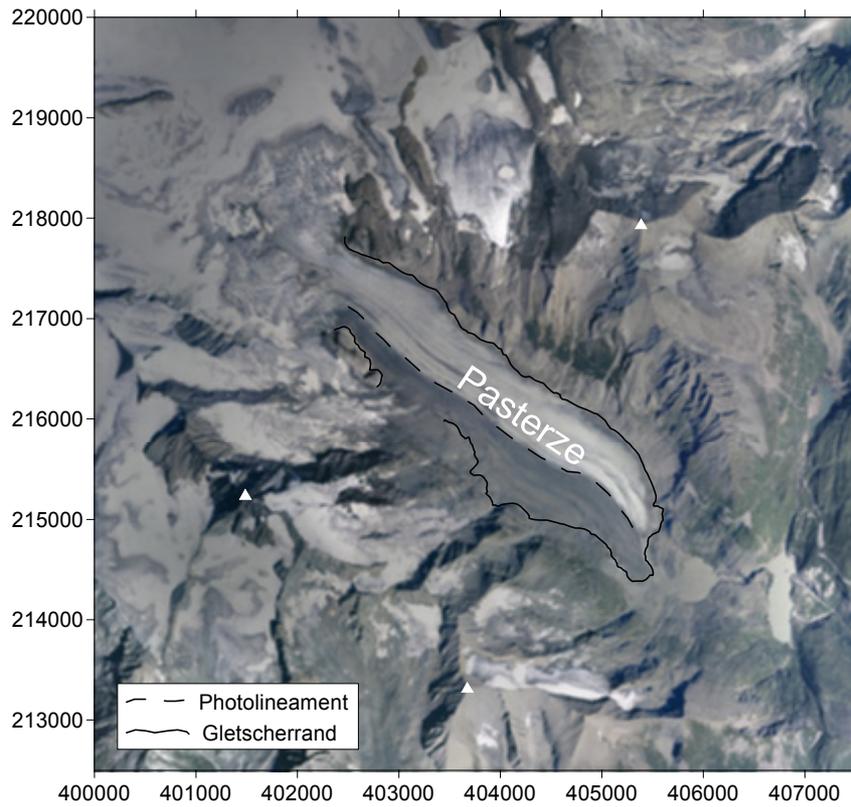


Abb. 34: Farborthophoto (August 1998) des Studiengbietes. Gauß-Krüger-Abbildung im Meridianstreifen M31, Koordinatenangaben im Bundesmeldenetz (BMN).
 Quellenangabe: Orthophoto © Nationalparkverwaltung Hohe Tauern.

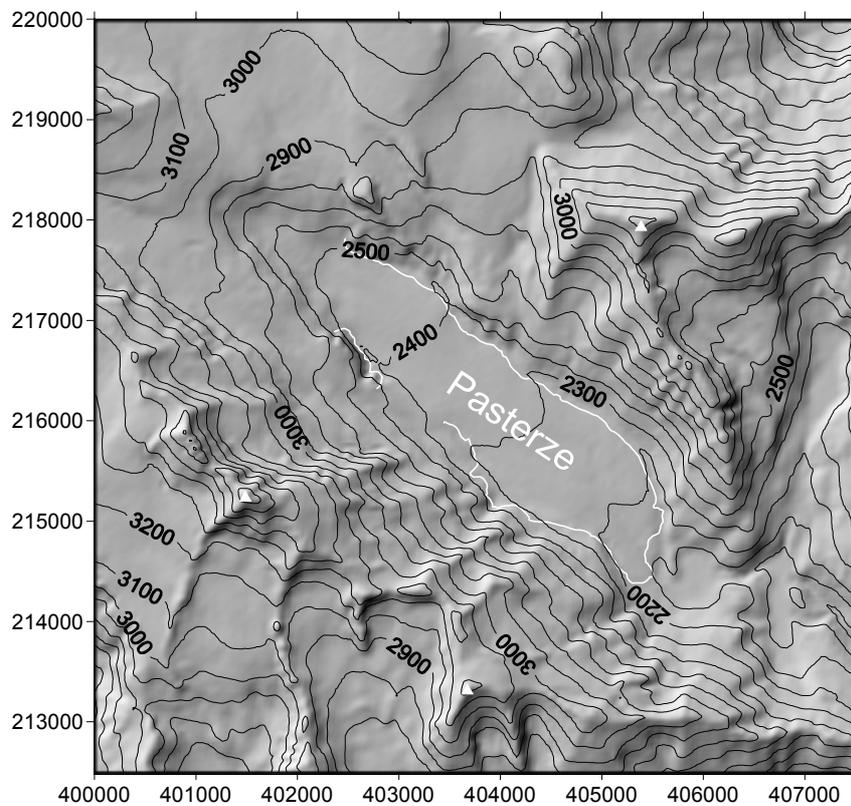


Abb. 35: Reliefkarte des Studiengbietes. Geländeschumierung: Beleuchtung von NW.
 Quellenangabe: Digitales Geländemodell (DGM) mit 20 m Stützstellenabstand,
 © Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Graz.

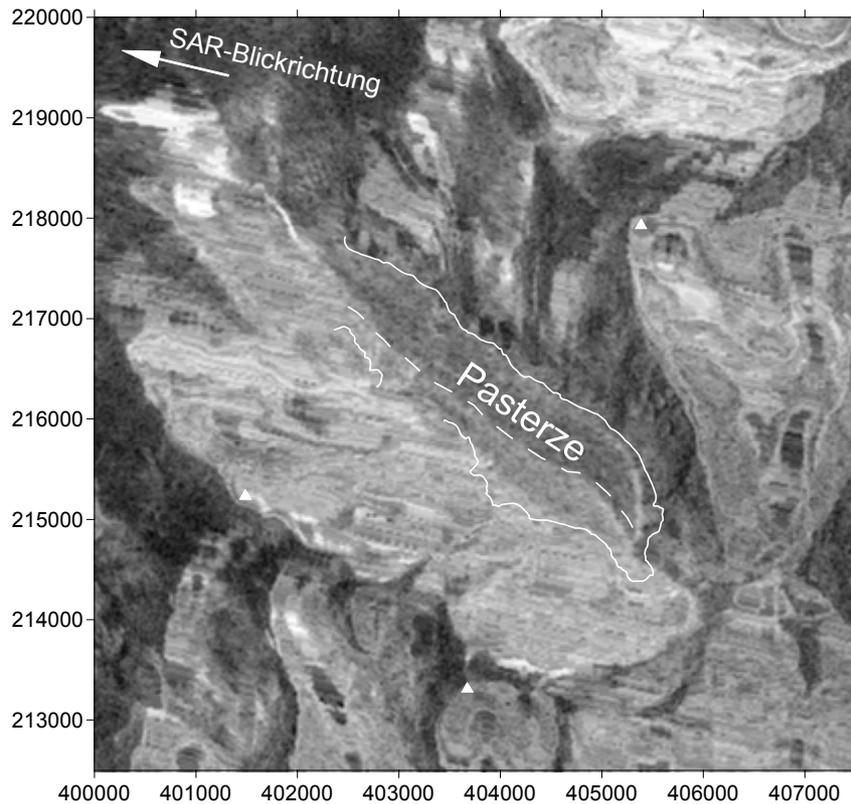


Abb. 36: Geokodiertes ERS SAR-Amplitudenbild des Orbit-Bildpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). SAR-Echos im *Overlay*-Bereich werden in SAR-Blickrichtung „aufgedehnt“ und stellen daher keine sinnvolle Information dar.

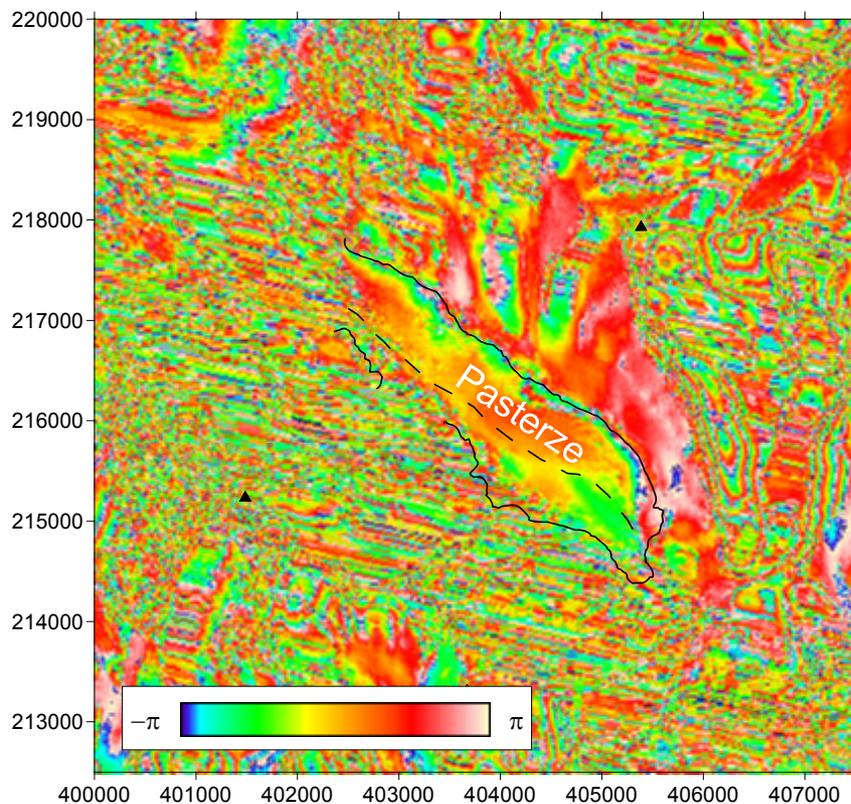


Abb. 37: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). Für einen Großteil der Pasterzen-Zunge unterhalb des Hufeisenbruchs ist Szenenkohärenz gegeben. *Layover*-Bereiche können interferometrisch nicht sinnvoll ausgewertet werden. Die gemessene Phasendifferenz (modulo 2π) spiegelt die Geländeverschiebung in SAR-Blickrichtung wider.

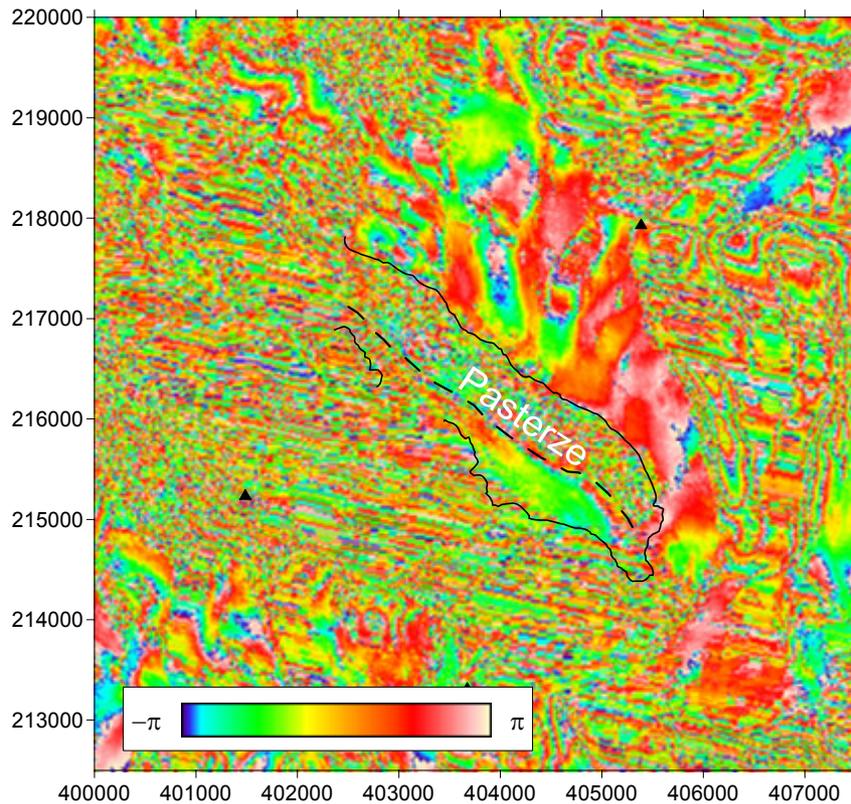


Abb. 38: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares (6.7.1999)-(7.7.1999). Für einen Großteil der Pasterzen-Zunge unterhalb des Hufeisenbruchs ist keine Szenenkohärenz gegeben. Der untere schuttbedeckte Teil der Pasterze liefert kohärente Signale. Ausgenommen sind auch hier wieder die *Layover*-Bereiche.

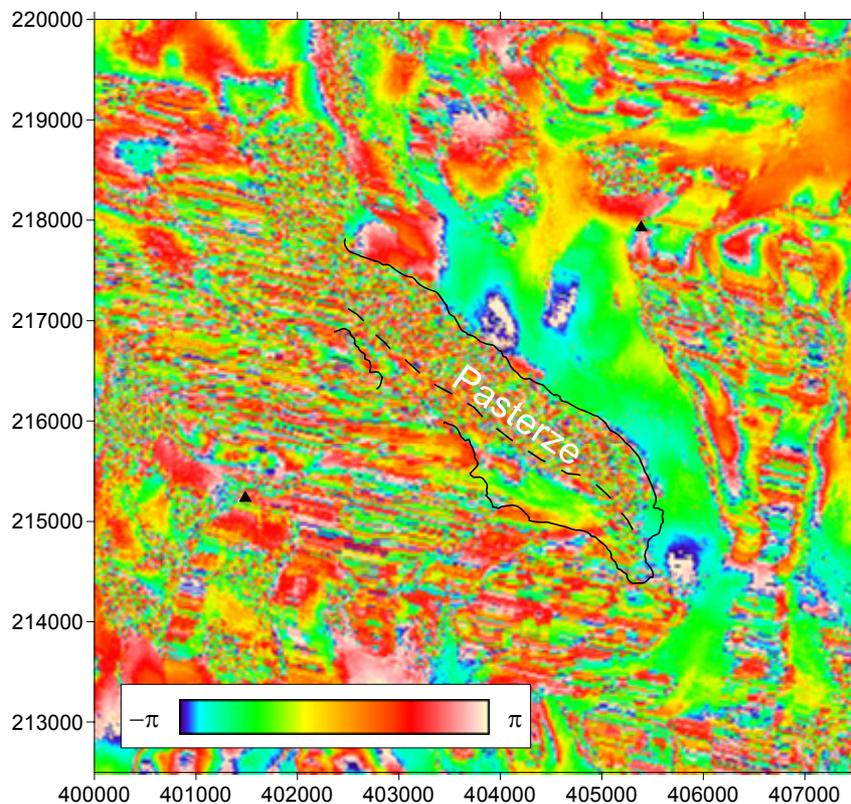


Abb. 39: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares (1.8.1995)-(2.8.1995). Für einen Großteil der Pasterzen-Zunge unterhalb des Hufeisenbruchs ist wiederum keine Szenenkohärenz gegeben.

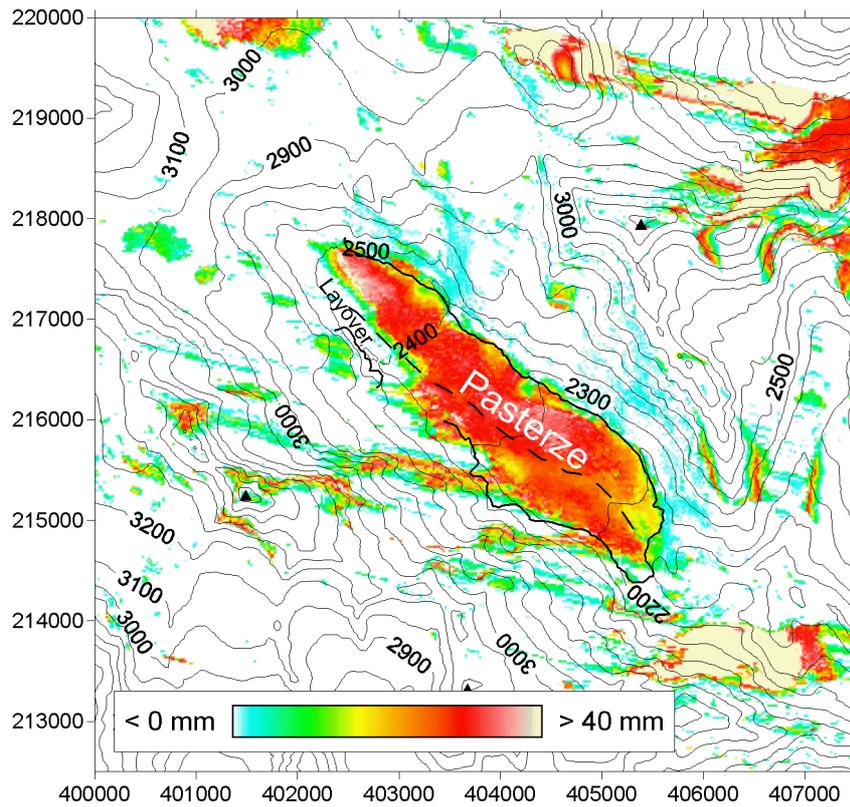


Abb. 40: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares (20.8.1995)-(21.8.1995). Die gemessenen Phasendifferenzen wurden durch einen *Unwrapping*-Prozess (*Brunch-Cut*-Methode) von der Phasenmehrdeutigkeit befreit und in weiterer Folge in äquivalente Verschiebungswerte (mm-Beträge) umgerechnet. Als Referenzfläche für die Kalibrierung der interferometrischen Relativmessung wurden stabile Bereiche unterhalb des Fuscherkarkopfs zwischen Franz-Josefs-Höhe und Hoffmannshütte gewählt.

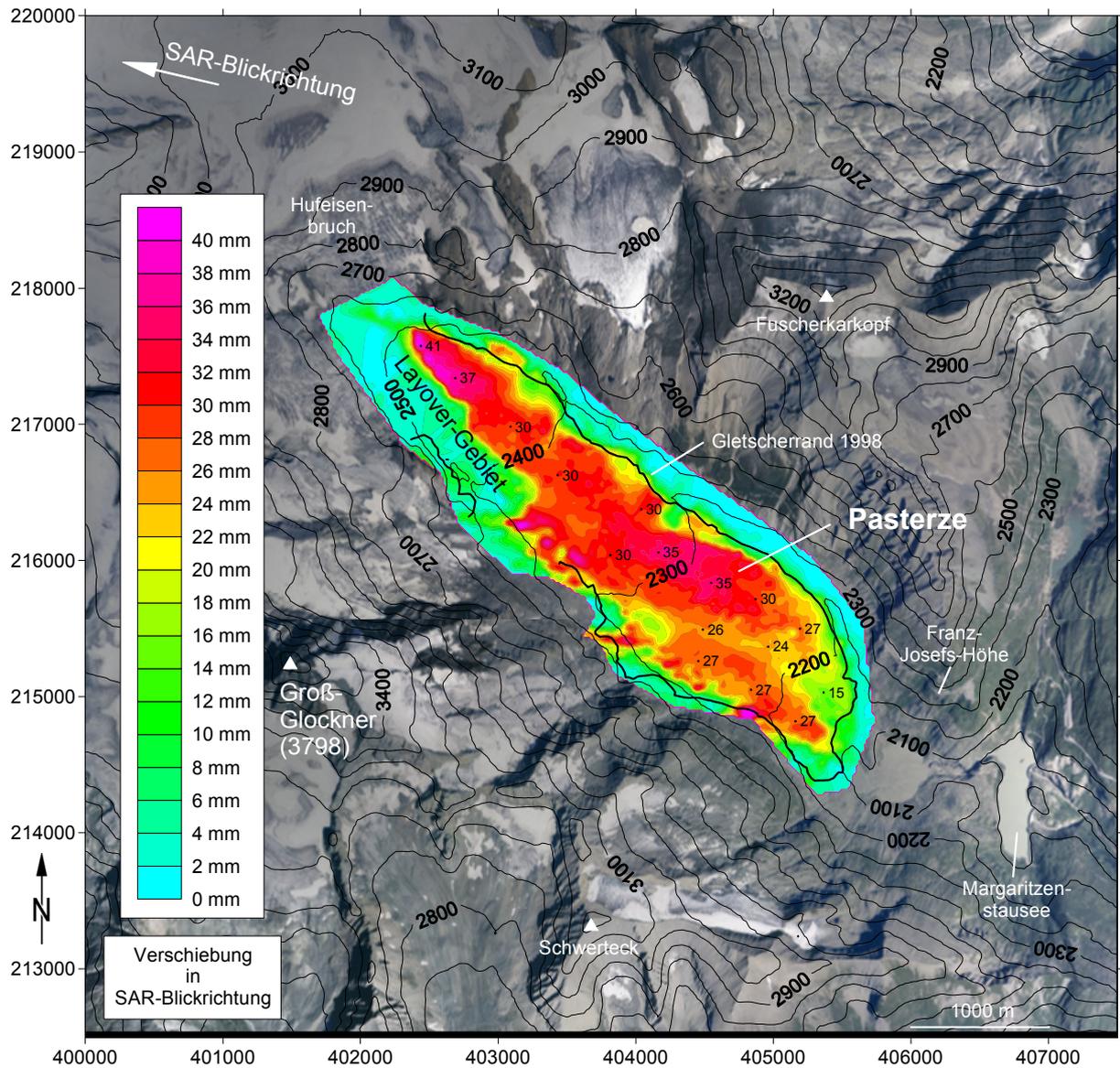


Abb. 41: Thematische Karte der Verschiebung der Oberfläche der Pasterze im Zungenbereich für den eintägigen Zeitraum 20.-21.8.1995. Die durch ERS-1/2 SAR-Interferometrie gewonnenen Verschiebungswerte beziehen sich auf die SAR-Blickrichtung.

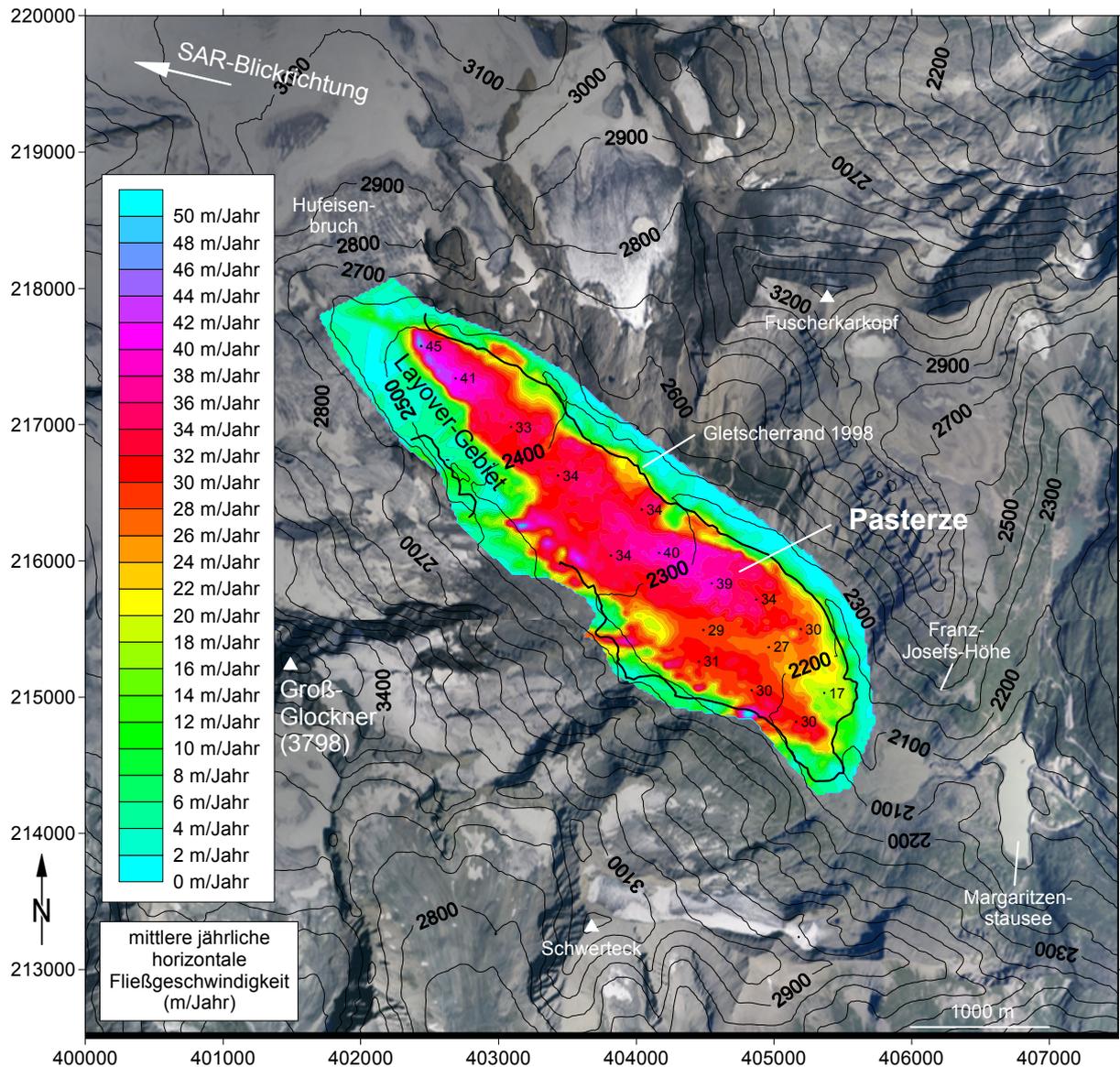


Abb. 42: Thematische Karte der geschätzten mittleren horizontalen Fließgeschwindigkeit der Pasterze abgeleitet aus dem eintägigen ERS-1/2 Interferogramm für den Zeitraum 20.-21.8.1995. Die Neigung der Gletscheroberfläche im gesamten Zungenbereich wurde mit 4° angenommen. Weiters wurde oberflächenparalleles Fließen vorausgesetzt. Eine mittlere tägliche Eisdickenänderung von 1 cm verändert den Wert für die ermittelte Fließgeschwindigkeit um 10,3 m/Jahr.

8.6. Literatur

- GEIST, TH. & STÖTTER, J., 2002: First results on airborne laser scanning technology as a tool for the quantification of glacier mass balance. Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, Bern, Switzerland, EARSeL eproceedings 2, 7 p.
- GUTJAHR, K., RAGGAM, H. & FRANKE, M., 2004: Potentials and limitations of Alpine glacier monitoring using differential SAR interferometry. Proceedings of 4th Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 148-155.
- JOUGHIN, I.R., KWOK, R. & FAHNESTOCK, M.A., 1998: Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (1), 25-37.
- KÄÄB, A., 1996: Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren im Hochgebirge. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 145, ETH Zürich, 182 S.
- KWOK, R. & FAHNESTOCK, M.A., 1996: Ice sheet motion and topography from radar interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34 (1), 189-200.
- LIEB, G.K., 2004a: Die Pasterze als Beispiel eines schwindenden Gletschers. In: ZÄNGL, W. & HAMBERGER, S., 2004: Gletscher im Treibhaus – Eine fotografische Zeitreise in die alpine Eiswelt. Tecklenborg Verlag, Steinfurt, 216-219.
- LIEB, G.K., 2004b: Die Pasterze – 125 Jahre Gletschermessungen und ein neuer Führer zum Gletscherweg. Grazer Mitteilungen der Geographie und Raumforschung 34, 3-5.
- LIEB, G.K. & SLUPETZKY, H., 2004: Gletscherweg Pasterze – Glocknergruppe. Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern, Band 2, Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, 122 S.
- LIEB, G.K., 2005: Die Pasterze. <http://www.uni-graz.at/geowww/pasterze/> (Zugriff am 23.6.2005).
- MATTAR, K.E., VACHON, P.W., GEUDTNER, D., GRAY, A.L., CUMMING, I.G. & BRUGMAN, M., 1998: Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS Tandem-Mission SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (3), 974-984.
- MOHR, J.J., REEH, N. & MADSEN, S.N., 2003: Accuracy of three-dimensional glacier surface velocities derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements. Journal of Glaciology 49 (165), 210-222.
- NAGLER, T., MAYER, C. & ROTT, H., 2002: Feasibility of DINSAR for mapping complex motion fields of Alpine ice- and rock glaciers. Proceedings of 3th Int. Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield, U.K., ESA-SP475, 377-382.
- OERLEMANS, J., 2001: Glaciers and Climate Change. Swets & Zeitlinger BV, Lisse, 148 S.
- PATZELT, G., 1996: Gletscherbericht 1994/95. Mitt. des Österr. Alpenvereins, Jg. 51 (121), Heft 2, 20-26.
- PATZELT, G., 2005: Gletscherbericht 2003/2004. Mitt. des Österr. Alpenvereins, Jg. 60 (130), Heft 2, 24-31.
- REEH, N., MOHR, J.J., MADSEN, S.N., OERTER, H. & GUNDESTRUP, N.S., 2003: Three-dimensional surface velocities of Storstrømmen glacier, Greenland, derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements. Journal of Glaciology 49 (165), 201-209.
- ROTT, H. & SIEGEL, A., 1997: Glaciological studies in the Alps and in Antarctica using ERS interferometric SAR. Proceedings of the Fringe 96 Workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, ESA SP-406, Vol. 2, 149-159.
- SHAROV, A.I., 2005: Interferometric Evaluation of Glacier Rheology and Alterations (INTEGRAL). Homepage, <http://dib.joanneum.at/integral/>, Zugriff am 23.6.2005.
- STROZZI, T., LUCKMAN, A., MURRAY, T., WEGMÜLLER, U. & WERNER, CH., 2002: Glacier Motion Using SAR Offset-Tracking Procedures. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40 (11), 2384-2391.
- STROZZI, T., GUDMUNDSSON, G.H. & WEGMÜLLER, U., 2003: Estimation of the Surface Displacement of Swiss Alpine Glaciers using Satellite Radar Interferometry. EARSeL eProceedings 2 (1), ISSN 1729-3782, 5 S.
- WAKONIGG, H. & LIEB, G.K., 1996: Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. Kärntner Nationalparkschriften 8, 99-115.
- VISCHER, D. (Hrsg.), 1997: Gletscherschwankungen im Alpenraum. Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 149, ETH Zürich, 84 S.

Web-links

Gletschermessungen an der Pasterze: <http://www.uni-graz.at/geowww/pasterze/>
Situationsdarstellung Pasterze: http://www.uni-graz.at/geowww/pasterze/homepage/anderes/Pas_karte.pdf
Interferometric Evaluation of Glacier Rheology and Alterations (INTEGRAL): <http://dib.joanneum.at/integral/>
(Zugriff am 23.6.2005)

9. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsprojekt wurde die Anwendungsmöglichkeit der satellitengestützten Radar-Interferometrie – basierend auf ERS-1/2 SAR-Bilddaten der Europäischen Weltraumbehörde ESA – für die großräumige und flächendeckende Erfassung der raum-zeitlichen Veränderung von Gletschern und Blockgletschern untersucht.

Für die Beantwortung der in der Aufgabenstellung formulierten Fragen wurde in einem ersten Schritt der aktuelle Kenntnisstand der im Jahre 1989 erstmals erprobten differentiellen SAR-Interferometrie zusammengefasst, in einem zweiten Schritt wurde eine Zusammenstellung von erfolgreichen Anwendungsbeispielen der DINSAR-Technologie in der Detektion und Erfassung der Bewegung von Gletschern und Blockgletschern vorgenommen, um dann in einem abschließenden Schritt diese Technologie exemplarisch auch auf ausgewählte Gletscher und Blockgletscher im Gebiet des Nationalparks Hohe Tauern anzuwenden.

Leider konnte für das vorgeschlagene Untersuchungsgebiet der Schobergruppe die DINSAR-Technologie nicht erfolgreich umgesetzt werden, da wider Erwarten mit den angekauften SAR-Bilddaten, aus welchen nur Interferogramme mit 1 bzw. 315 bzw. 350 Tagen Zeitdifferenz berechnet werden konnten, die Bewegung der Gletscher bzw. Blockgletscher in diesem Gebiet nicht erfasst werden konnte. Die Gründe hierfür liegen einerseits darin, dass die Bewegungsraten der Gletscher und Blockgletscher in der Schobergruppe zu gering sind, um sie – trotz guter Kohärenz – in den eintägigen Interferogrammen signifikant messen zu können, und andererseits darin, dass bei den nahezu einjährigen Interferogrammen die SAR-Signale über den Gletschern bzw. Blockgletschern völlig dekorreliert waren. Im gegenständlichen Fall wäre ein Zeitintervall von 35 Tagen optimal gewesen.

In weiterer Folge wurden der *Dösener Blockgletscher* und die *Pasterze* als zusätzliche Studienobjekte in den Projektumfang aufgenommen. Das Bewegungsmuster des Dösener Blockgletschers konnte aus einem 35-tägigen Interferogramm (Bildpaar 23.8./27.9.1992) mit sehr hoher Genauigkeit (mm-Auflösung) abgeleitet werden. Die maximale Bewegung (Deformation) wurde mit 18 mm/35 Tage im oberen, steileren Teil des Blockgletschers festgestellt. Aus einem gut kohärenten Bildpaar (20.8./21.8.1995) der ERS Tandem-Mission konnte die eintägige, durch Fließbewegung und Schmelzprozesse verursachte Oberflächendeformation für die 4 km lange Pasterzenzunge nahezu flächendeckend ermittelt werden. Es konnte eine maximale Verschiebung der Gletscheroberfläche von 35-40 mm/Tag in Radarblickrichtung festgestellt werden.

Die entscheidenden Faktoren für eine erfolgreiche Anwendung von DINSAR im Gletscher- bzw. Blockgletscher-Monitoring unter Verwendung von ERS-1/2 SAR-Bilddaten sind:

- Szenenkohärenz
- Datenverfügbarkeit
- Hauptfließrichtung
- Hangneigungsrichtung
- Gletschergröße
- Genauigkeit des digitalen Geländemodells
- Genauigkeit der Orbitparameter
- Leistungsfähigkeit der Algorithmen, wie z.B. das *Phase Unwrapping*.

Nachfolgende Zuordnungstabelle bewertet – getrennt für Gletscher und Blockgletscher – die wichtigsten Faktoren:

Typ	optimales Zeitintervall (Tage) zwischen den Aufnahmen	optimaler Aufnahmezeitpunkt	Hauptfließrichtung	Hangneigungsrichtung	Orbitbahn
schnell fließender Gletscher (> 6,6 m/Jahr)	1	Wintermonate (kein nasser Schnee, keine Schneeverfrachtungen)	EW	Westhang	descending
			(WE)	(Osthang)	
			WE	Osthang	ascending
			(EW)	(Westhang)	
Blockgletscher, langsam fließender Gletscher	35, (70, 105)	Sommermonate (kein Alt- bzw. Neuschnee)	EW	Westhang	descending
			WE	Osthang	ascending

Anmerkungen: Die Basislinien sollten möglichst klein sein.

Das digitale Geländemodell sollte möglichst genau sein.

Die Fläche des Gletschers bzw. Blockgletschers sollte mindestens 10-20 ha groß sein.

Bei langsam fließenden Gletschern ist die Wahrscheinlichkeit eher sehr gering, dass nach 35 Tagen bzw. bei Vielfachen dieses Zeitintervalls noch eine ausreichende Kohärenz vorhanden ist.

Die Euphorie der Fachwelt über den Einsatz der satellitengestützten Radar-Interferometrie zur großräumigen Bewegungsdetektion und -messung muss bei Hochgebirgsanwendungen relativiert werden. Für eine erfolgreiche Anwendung müssen sehr viele Einzelparameter stimmen, insbesondere auch die Datenverfügbarkeit.

Für eine abgesicherte Analyse sollten immer unbedingt mehrere brauchbare SAR-Interferogramme des zu untersuchenden Gletschers bzw. Blockgletschers miteinander verglichen und in den Analyseprozess einbezogen werden.

Für viele Untersuchungen reicht es oft schon, herauszufinden, ob sich ein Hang, Gletscher oder Blockgletscher bewegt oder nicht, um dann andere, geeignetere Beobachtungsmethoden wie z.B. die Luftbildphotogrammetrie einzusetzen.

Das Potenzial der satellitengestützten Radar-Interferometrie ist offensichtlich, was sich nicht nur in den zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten und in den in diesem Forschungsprojekt gezeigten Beispielen widerspiegelt, sondern auch in den geplanten und speziell auf DINSAR ausgerichteten Satellitenmissionen, wie z.B. ALOS PALSAR und TerraSAR-X.

Dank

Die Autoren bedanken sich herzlichst bei der Nationalparkverwaltung Hohe Tauern für die Finanzierung des gegenständlichen Projekts. Spezieller Dank gilt Herrn Mag. G. MUSSNIG, Nationalparkverwaltung Hohe Tauern, für seine Unterstützung bei der Projektfindung. Für die Mithilfe bei der Erstellung des Endberichts gebührt Frau R. HÖDL, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der TU Graz, besonderes Lob. Prof. Dr. G.K. LIEB, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, hat beim Kap. 5 sein Fachwissen in dankenswerter Weise eingebracht. Herr Dr. A. SHAROV sowie Herr Dr. K. GUTJAHR, beide vom Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, haben durch kritische Diskussion ebenfalls zum Gelingen des Projekts beigetragen.

Adressen der Autoren:

Mag. Michael AVIAN
Institut für Geographie und Regionalforschung
Universität Graz
Heinrichstraße 36, A-8010 Graz
Tel.: +43 380-5246
Fax: +43 380-9886
e-mail: m_avian@yahoo.com

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Viktor KAUFMANN
Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, A-8010 Graz
Tel.: +43 316 873-6336
Fax: +43 316 873-6337
e-mail: viktor.kaufmann@tugraz.at

Dr. Lado Wani KENYI
Institut für Digitale Bildverarbeitung
Joanneum Research
Wastiangasse 6, A-8010 Graz
Tel.: +43 316 876-1715
Fax: +43 316 876-1720
e-mail: lado-wani.kenyi@joanneum.at

derzeit
Department of Geography
University of Maryland
U.S.A.
Tel.: +1 301 405 3472, +1 443 538 8515
e-mail: lado-wani.kenyi@joanneum.at

Anhang: **Grundlagen der Fernerkundung mit Radar**

V. KAUFMANN