

Überwachung isländischer Vulkane mit innovativen Fernerkundungs-Technologien und 3D Visualisierung

Julia Jaenicke¹, Ulrich Münzer¹, Christoph Mayer², Christian Minet³, Jonas Franke⁴,
Florian Siegert⁴, Ágúst Guðmundsson⁵

¹ Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie, Ludwig-Maximilians-Universität, Luisenstr. 37, 80333 München, E-Mail: Julia.Jaenicke@lmu.de, ulrich.muenzer@iaag.geo.uni-muenchen.de

² Kommission für Erdmessung und Glaziologie, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

³ Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen

⁴ Remote Sensing Solutions GmbH, Baierbrunn

⁵ Fjarkönnun ehf., Kópavogur, Island

Zusammenfassung. Die phreatomagmatische Eruption des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 hatte durch die Beeinträchtigung des europäischen Luftverkehrs einen enormen wirtschaftlichen Schaden verursacht. Basierend auf diesem Ereignis wird im Projekt IsViews (Iceland subglacial Volcanoes interdisciplinary early warning system) der wenige Kilometer entfernte Mýrdalsjökull mit dem subglazialen Zentralvulkan Katla untersucht. Ein erneuter Vulkanausbruch wird erwartet.

Das interdisziplinär ausgerichtete Forschungsprojekt steht im Kontext von GMES. Zur Überwachung stehen eine Zeitreihe von TerraSAR-X (TSX) Daten seit 2010, optische Daten der RapidEye Satelliten sowie höchstauflösende HRSC Luftbilddaten zur Verfügung. Unterstützt wird das Monitoring der geodynamischen Prozesse mit kontinuierlichen Höhenmodellen aus der TanDEM-X Mission. Diese werden mit Hilfe von aktuellen LiDAR Daten verifiziert. Eine umfangreiche GIS-Datenbank wird regelmäßig erweitert, u.a. durch near real-time Stripmap TSX Szenen, aktuelle Seismik- und Wetterdaten sowie Informationen über die Gletscherdynamik.

Im Sommer 2013 wurden auf dem Mýrdalsjökull zwei automatische GPS Stationen, drei Pegelstationen und am DLR neu entwickelte Top-Hat Reflektoren zur Erfassung der glazialen Bewegungsvorgänge aufgebaut. Die Reflektoren konnten auf experimentellen Staring Spotlight TSX Daten mit einer Bodenauflösung von wenigen Dezimetern identifiziert werden. Eine Höhendifferenz-Analyse von sieben TanDEM-X Szenen, aufgenommen zwischen September 2011 und Juni 2013, zeigt, dass es möglich ist mit diesen innovativen Daten Änderungen des Gletschervolumens sowie Eisdepressionen zu detektieren.

Ziel des Projektes ist es Veränderungen der Gletscheroberfläche, ausgelöst durch subglaziale vulkanische Aktivitäten, automatisch zu erfassen. Ein satellitengestütztes near real-time Monitoring zur Früherkennung von Naturereignissen wird entwickelt und in eine internetbasierte 3D Visualisierungsumgebung integriert. Hierfür wurde bereits ein 3D Modell von ganz Island basierend auf 267 RapidEye Bildkacheln aus den Jahren 2011 und 2012 erstellt. Die hohe vulkanische Aktivität auf Island erlaubt, Anwendungen und Methoden mittels near real-time Fernerkundungs- und GIS-Daten für den Katastrophenschutz zu erproben und einzusetzen.

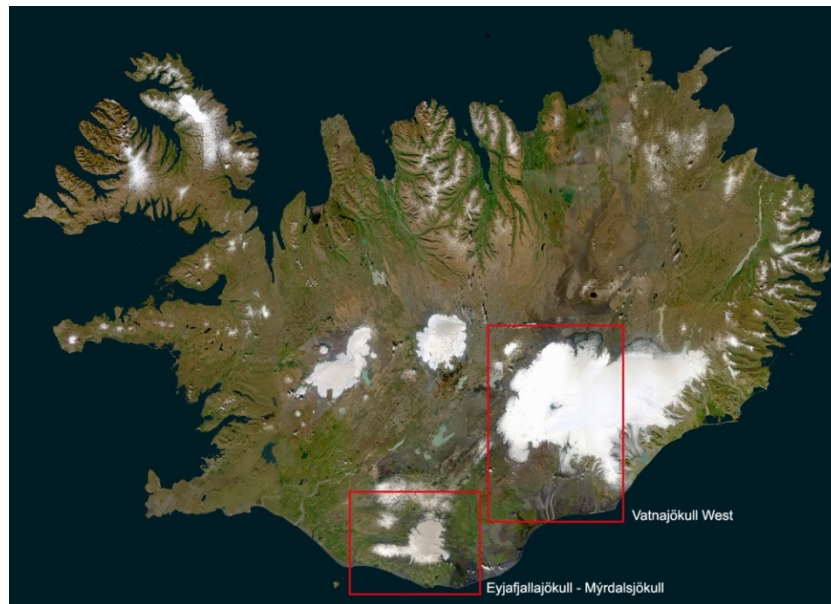


Abb. 1. Die Untersuchungsgebiete im Projekt IsViews: Eyjafjallajökull - Mýrdalsjökull und Vatnajökull West, dargestellt auf einem im Projekt erstellten RapidEye Bildmosaik (Bilddaten © BlackBridge AG via DLR/RESA ID 619).

1. Einleitung

Subglaziale Vulkanausbrüche liefern oft einige Zeit vor einem katastrophalen Ereignis Indikatoren einer erhöhten Aktivität. Häufige Erscheinungen sind Depressionen in der Eisoberfläche, die sich aufgrund von vulkanischem Wärmefluss bilden (Björnsson et al. 2001, Guðmundsson et al. 2007). Als Folge der Eisschmelze ereignen sich oft enorme Schmelzwasserfluten, die am Gletscherrand austreten (Roberts 2005). Diese sog. Gletscherläufe (isl. Jökulhlaups) können gewaltige Schäden verursachen (Knudsen et al. 2001, Björnsson 2002). Weitere Indikatoren für einen bevorstehenden Vulkanausbruch sind erhöhte seismische Aktivität sowie ein veränderter Chemismus in den Gletscherflüssen. Im Projekt IsViews (Iceland subglacial Volcanoes interdisciplinary early warning system) werden vergletscherte Vulkane auf Island mit Hilfe von innovativen Fernerkundungstechnologien und 3D Visualisierung überwacht.

Island ist die größte Erhebung des Mittelozeanischen Rückens und nach Hawaii die zweitaktivste Vulkaninsel der Erde (Schmincke 2000). Die Entstehung der Insel kann durch das Zusammenspiel der Kontinentaldrift von Nordamerikanischer und Eurasischer Platte mit einer tiefliegenden Mantelströmung erklärt werden. Das Hot Spot Zentrum befindet sich unter dem Nordwestrand des Vatnajökull Eisplateaus. Die aktive Zone wird als Neovulkanzone bezeichnet und nimmt mit ca. 30.000 km² rund ein Drittel des Landes ein. Seit der Besiedelung der Insel vor etwa 1100 Jahren wurden ca. 40 km³ Lava aus 30 Vulkansystemen gefördert (Sæmundsson 1979). Die letzten beiden großen Vulkaneruptionen ereigneten sich im Frühjahr 2010 am Eyjafjallajökull und im Mai 2011 am Vatnajökull (Grimsvötn). Besonders der phreatomagmatische Ausbruch des vergletscherten Vulkans Eyjafjallajökull verursachte den Ausstoß gewaltiger

Aschemengen. Der Flugverkehr musste infolgedessen über weiten Teilen Nord- und Mitteleuropas für mehrere Tage eingestellt werden. Die finanziellen Folgen durch die Flugsperren für die betroffenen Luftfahrtunternehmen wurden auf etwa 250 Millionen Dollar täglich beziffert (Guðmundsson et al. 2010). Die Frühwarnung eines erneuten Ausbruchs könnte die Auswirkungen abmildern, da sich die Fluggesellschaften, die Reisenden und die Luftfracht-Unternehmen auf die Situation vorbereiten könnten.

Die hohe vulkanische Aktivität auf Island ermöglicht Methoden und Anwendungen mittels near real-time Fernerkundungs- und GIS-Daten für den Katastrophenschutz zu erproben und einzusetzen. Das interdisziplinär ausgerichtete Forschungsprojekt IsViews steht im Kontext des Erdbeobachtungsprogrammes Copernicus der Europäischen Union, zuvor GMES genannt. Zur Überwachung stehen u.a. eine Zeitreihe von TerraSAR-X Daten seit 2010, TanDEM-X Daten seit 2011, optische Daten der RapidEye Satelliten sowie in situ Geodaten zur Verfügung. Ziel des Projektes ist es auf Basis dieser zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Daten eine Prozesskette zu entwickeln, die es ermöglicht Indikatoren eines subglazialen Ausbruchs automatisch zu erfassen. Hierfür wurden erste glaziologische Untersuchungen am Mýrdalsjökull gemacht, neu entwickelte Top-Hat Reflektoren installiert und TanDEM-X Differenzbilder analysiert. Ein 3D Modell von ganz Island wurde auf Basis von 267 RapidEye Bildkacheln erstellt. Dieses Modell ist in eine internetbasierte 3D Visualisierungsumgebung eingebunden und bildet die Grundlage für einen operationellen Dienst zur Frühwarnung vor Naturereignissen.

2. Untersuchungsgebiet

Für das Forschungsprojekt IsViews wurden zwei Untersuchungsgebiete ausgewählt, die in der hochaktiven Neovulkanzone Islands liegen. Es handelt sich um den westlichen Teil des Vatnajökull mit dem hochaktiven Zentralvulkan Grimsvötn sowie um den Vulkankomplex Eyjafjallajökull - Mýrdalsjökull an der Südküste Islands (Abb. 1).

Die ersten Untersuchungen zum Aufbau des near real-time Frühwarnsystems wurden am Mýrdalsjökull mit dem subglazialen Zentralvulkan Katla durchgeführt (Abb. 2). Der Mýrdalsjökull ist mit ca. 586 km² Fläche der viertgrößte Plateau-Gletscher Islands (Jaenicke et al. 2006). Durch die ozeannahe Lage und dem Einfluss des Golfstroms erhält der Gletscher starke Winterniederschläge und weist im Sommer hohe Abschmelzraten auf (Björnsson et al. 2000). Glazialmorphologisch lässt sich der Mýrdalsjökull in drei Bereiche unterteilen. Im Zentrum befindet sich ein ca. 130 km² großes Eisplateau, nördlich davon das 140 km² große, fächerförmige Eisschild des Sléttjökull und im Süden, Osten und Westen viele steil abfallende Auslassgletscher. Der Gletscher erstreckt sich über eine Höhendifferenz von ungefähr 1360 m, von seinem tiefsten Punkt, der Gletscherzunge des Sólheimajökull, auf 120 m ü.d.M. bis zu seinem höchsten Punkt auf 1480 m ü.d.M., der Eiskuppe Goðabunga. Die Eismächtigkeit wurde mit Hilfe von Radio Echo Sounding bestimmt und weist im nördlichen Teil der Katla-Caldera eine Dicke von bis zu 700 m auf (Björnsson et al. 2000). Nach Björnsson et al. (2000) beträgt das gesamte Eisvolumen des Mýrdalsjökull 140 km³, von denen ca. 45 km³ innerhalb der Caldera des Zentralvulkans liegen.

Auf der Eisoberfläche befinden sich im Bereich der subglazialen Caldera 10-20 Eisdepressionen und verdeutlichen die hohe geothermische Aktivität der Katla (Björnsson et al. 2000, Scharer et al. 2007). Zudem ist das Untersuchungsgebiet von erhöhter seismischer Aktivität gekennzeichnet (Thorbjarnardóttir et al. 2007). Im Bereich des Mýrdalsjökull wurden z.B. im Jahr 2010 über 6.900 Erdbeben vom Meteorologischen Institut Islands registriert. Der letzte große Gletscherlauf ereignete sich im Juli 2011. Die gewaltige Flut zerstörte eine 128 m lange Brücke über den Fluss Múlakvísl und unterbrach den Verkehr auf der Nationalstraße 1 entlang der Südküste für eine ganze Woche. Im Zusammenhang mit diesem Jökulhlauf bildeten sich nahe der Katla zwei Eisdepressionen mit einer Tiefe von über 100 m. Die

Abflussmenge aus den entstandenen Depressionen wird auf 40 Millionen m³ geschätzt (Jóhannesson et al. 2013). Der letzte gewaltige Ausbruch der Katla mit katastrophalen Auswirkungen auf die Umwelt ereignete sich 1918 (Larsen 2000). Begleitet wurde das Naturereignis von einem Gletscherlauf im Mýrdalssandur mit einem maximalen Abfluss von ca. 300.000 m³/s (Tómasson 1996). Betrachtet man den Eruptionszyklus der Katla (längste Ruhephase 80 Jahre, kürzeste 13), so ist mit einem erneuten subglazialen Vulkanausbruch am Mýrdalsjökull zu rechnen.

Ein weiteres Indiz für erhöhte geothermische Aktivität im Untersuchungsgebiet sind die vulkanischen Eruptionen am Eyjafjallajökull und Fimmvörðuhals im Frühjahr 2010. Der Mýrdalsjökull befindet sich nur wenige Kilometer östlich vom Eyjafjallajökull. Beide Gletscher sind durch den Bergsattel „Fimmvörðuhals“ miteinander verbunden. Bei den vergangenen Eruptionen des Eyjafjallajökull Vulkans in den Jahren 920, 1612 und 1821-1823 brach gleichzeitig oder wenig später auch die Katla aus (Larsen 2000, Guðmundsson et al. 2005, Langmann et al. 2012). Ein Zusammenhang zwischen den beiden Vulkansystemen wird daher vermutet.

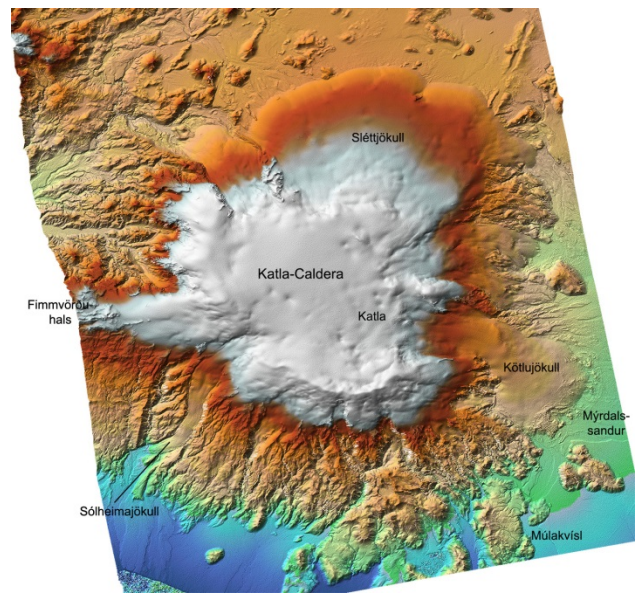


Abb. 2. TanDEM-X Höhenmodell (RawDEM) vom 18.3.2013 zeigt den Mýrdalsjökull mit dem subglazialen Zentralvulkan Katla (© DLR).

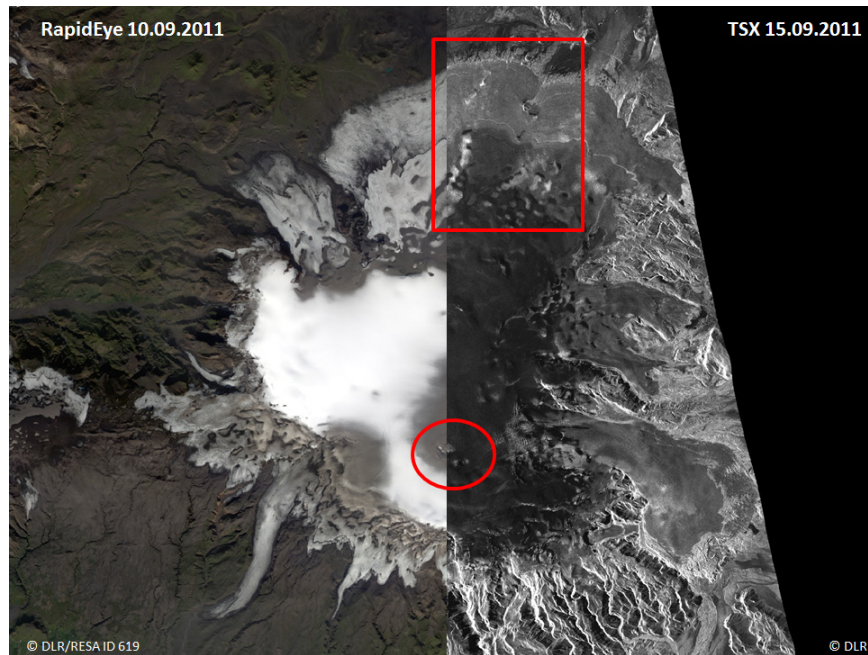


Abb. 3. Gegenüberstellung einer optischen, Echtfarben RapidEye und einer TerraSAR-X Szene mit nahezu gleichem Aufnahmedatum vom Untersuchungsgebiet Mýrdalsjökull. Rot markiert sind das Gebiet der Geländearbeiten 2013 am Sléttjökull Auslassgletscher im Norden und die Eisdepressionen des Gletscherlaufs vom 9. Juli 2011.

3. Fernerkundungs- und Geodaten

Im Rahmen des Projektes IsViews laufen sechs Proposals, die einen kontinuierlichen Bezug von TerraSAR-X, TanDEM-X und RapidEye Satellitenbildern gewährleisten. Für die Jahre 2010 bis 2013 liegt eine Zeitreihe von insgesamt 74 TerraSAR-X (TSX) Stripmap Szenen (eec_se) vom Mýrdalsjökull mit einer Auflösung von 1,25 m vor. Der repeat pass Zyklus von TerraSAR-X beträgt 11 Tage. Jedoch sind mit Hilfe von verschiedenen Blickwinkeln und Aufnahmemodi des Satelliten und wegen der subpolaren Lage Islands bis zu zwei Datenakquisitionen pro Tag möglich. Während des Vulkanausbruches am Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 hat sich gezeigt, dass der TerraSAR-X Satellit hervorragend für ein near-real time Monitoring im Katastrophenfall geeignet ist (MÜNZER et al. 2010). Gegenüber von Luftbildern hat die Überwachung von Naturereignissen auf Island mit satellitengestützten Radaraufnahmen mehrere Vorteile: sie ist deutlich kostengünstiger, wetterunabhängig und unbeeinflusst der vulkanischen Gefahr.

Neben der lückenlosen Zeitreihe von TerraSAR-X Daten verfügt das Projekt über bisher sieben Höhenmodelle (RawDEMs) des Mýrdalsjökull aus der TanDEM-X Mission, aufgenommen zwischen 2011 und 2013 mit einer räumlichen Auflösung von 6 m und einer Höhengenaugigkeit von <10 m. Ergänzt werden diese Daten durch höchstauflösende LiDAR Daten der Untersuchungsgebiete mit einer vertikalen Auflösung von 50 cm. Sie wurden in den Jahren 2010 bis 2012 vom Meteorologischen Institut Islands gezielt für glaziologische Fragestellungen erstellt.

Während der Geländearbeiten am Sléttjökull im Sommer 2013 wurden 17 experimentelle Staring Spotlight TSX Daten mit einer Auflösung von wenigen Dezimetern zur Identifizierung von Top-Hat Reflektoren aufgenommen.

Im Zuge eines RapidEye Proposals konnten von den Jahren 2011 bis 2013 circa 500 nahezu wolkenfreie Bildkacheln aus den Sommermonaten bestellt werden. Diese hochauflösenden optischen Daten dienen zur Verifizierung der Radardaten, der Erstellung einer 3D Karte von ganz Island und zur Erfassung der Fließbewegung der Gletscherzungen. Abbildung 3 zeigt die sich gegenseitig ergänzenden multi-source Satellitendaten vom Mýrdalsjökull, aufgenommen mit nur fünf Tage Zeitdifferenz.

Ergänzt werden die Fernerkundungsdaten durch zahlreiche in situ Geodaten. Hierzu zählen meteorologische Daten für die Interpretation der Radaraufnahmen, Seismik und chemische Daten der Gletscherflüsse zur Früherkennung erneuter subglazialer Vulkanausbrüche sowie Informationen über den Massenhaushalt und das Fließverhalten der Gletscher.

4. Laufende Projektarbeiten

Innerhalb des Untersuchungsgebietes Mýrdalsjökull konzentrieren sich derzeit die Arbeiten im IsViews Projekt auf zwei Bereiche: 1) die beiden Eisdepressionen, die durch subglaziale geothermische Schmelze im Juli 2011 im Bereich der Katla entstanden sind und 2) der Sléttjökull Auslassgletscher im Norden (s. Abb. 3).

Für den Aufbau eines Frühwarnsystems am Mýrdalsjökull ist es wichtig das Verhalten des Gletschers zu verstehen. Es müssen Oberflächenveränderung durch

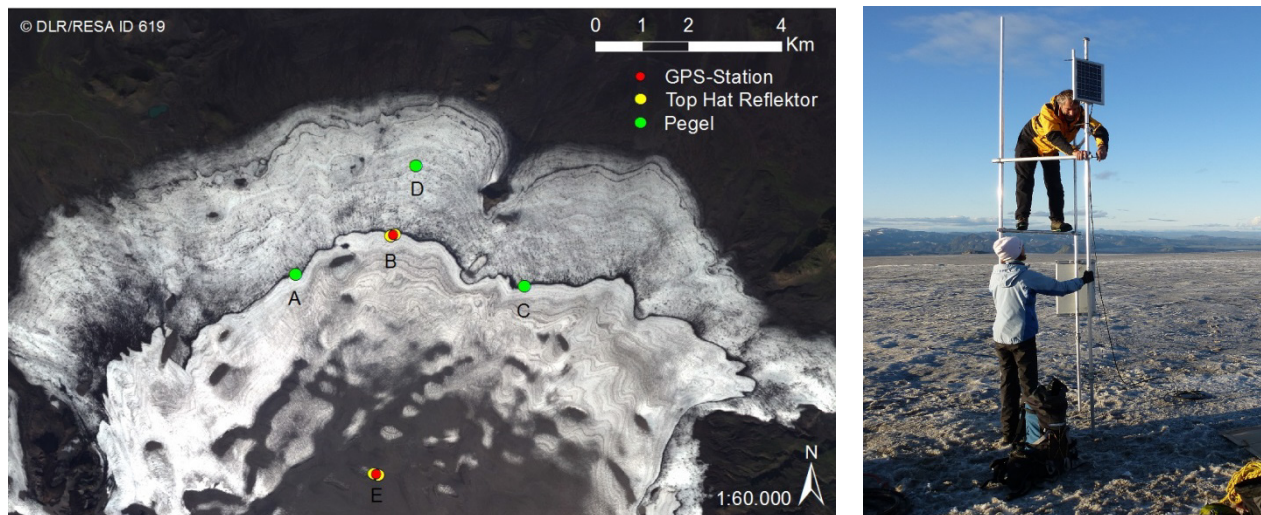


Abb. 4. Im Zuge der Feldarbeiten am Sléttjökull wurden im Sommer 2013 verschiedene Messstationen aufgebaut. Das Foto rechts zeigt die permanente GPS Station am Punkt E im Bereich der Gleichgewichtslinie.

glaziologische Prozesse (Massenbilanz und Eisdeformation) und durch subglaziale Prozesse (Schmelzwasser vornehmlich aus vulkanischen Aktivitäten) dokumentiert und analysiert werden.

4.1. Glaziologische Untersuchungen

Im August 2013 wurden in der Ablationszone des Sléttjökull zwei permanente GPS Stationen, vier Top-Hat Reflektoren und drei Holzpegel errichtet (Abb. 4). Die GPS Station B wurde knapp oberhalb eines ca. 20 m breiten Aschebandes einer früheren Katla Eruption auf 900 m ü.d.M. und die Station E im Bereich der Gleichgewichtslinie auf 1100 m ü.d.M. aufgebaut. Die beiden Stationen bestehen jeweils aus einem kostengünstigen und einfach zu transportierendem System von Aluminiumstangen, Mikrocomputer und einer Stromversorgung über spezielle Langzeitbatterien und einem Solarpanel. In einem Netzwerk von Referenzstationen können damit exakte Positionsbestimmungen in hoher zeitlicher Auflösung gewonnen werden. Dies ermöglicht eine genaue Analyse der jahreszeitlichen Variation der Geschwindigkeiten, sowohl horizontal als auch vertikal. Neben den beiden GPS Stationen wurden zusätzlich noch zwei Holzpegel entlang des Aschebandes sowie einer im unteren Ablationsbereich auf 850 m ü.d.M. eingbohrt. Damit können Geschwindigkeitsgradienten entlang des Fließweges des Eises sowie Schmelzgradienten bestimmt werden.

Die auf Satellitenbildern deutlich sichtbaren Ascheablagerungen auf dem Eis verhalten sich in Abhängigkeit ihrer Morphologie sehr unterschiedlich. Die im Eis eingefrorenen Ascheschichten schmelzen allmählich an der Oberfläche aus. Das heißt ihre auf den Bilddaten scheinbare Bewegung ist eine Kombination aus Fließbewegung des Gletschers, Eisschmelze und Neigungswinkel der Ascheschicht im Eis. Auf der Eisoberfläche akkumulierte Asche dagegen bewegt sich

mit der Eisbewegung hangabwärts und erfährt nur unwesentliche Umlagerungen durch die Eisschmelze.

Für die fernerkundlichen Analysen wurden daher drei der glaziologischen Messstellen entlang des ausgeprägten Aschebandes auf dem Sléttjökull installiert. Das Ascheband ist in den Sommermonaten sowohl auf den optischen RapidEye Daten, als auch – aufgrund seiner hohen Rauigkeit – auf den TerraSAR-X Radarbildern deutlich zu erkennen. Mit Hilfe der Satellitenbilder sowie der in situ Daten kann künftig die *feature tracking* Methode angewandt werden, um das Fließverhalten des Gletschers zu beobachten und Veränderungen der Oberfläche exakt zu interpretieren.

4.2. Top-Hat Experiment

Im Zuge der Feldarbeiten im Sommer 2013 wurden im Bereich der GPS Stationen vier, am DLR neu entwickelte Radar Reflektoren für einen experimentellen Versuch aufgestellt (s. Abb. 4). Diese Top-Hat Reflektoren wurden so konzipiert, dass sie auf den gleichen Aluminiumstangen wie für die GPS Stationen installiert werden konnten (Abb. 5). Im Gegensatz zu den für Positionsbestimmungen üblicherweise verwendeten Corner-Reflektoren besitzen die Top-Hat Reflektoren einen Durchmesser von nur 50 cm. Sie sind somit kostengünstig in der Herstellung, leicht zu transportieren und einfach aufzustellen. Ein weiterer großer Vorteil ist ihre runde Form. Somit müssen die Top-Hat Reflektoren nicht auf eine bestimmte Aufnahmegeometrie des Satelliten ausgerichtet werden. Aufgrund der zu erwartenden Niederschläge im Winter wurden die Reflektoren ca. 2 m über der Gletscheroberfläche angebracht.

Entscheidend für ein Identifizieren der kleinen Top-Hat Reflektoren im Radarbild ist eine sehr hohe räumliche Auflösung der Daten. Der im Jahr 2013 neu implementierte Staring Spotlight Modus des TSX Satelliten



Abb. 5. Ansicht von zwei Top-Hat Reflektoren (links) und einem auf dem Sléttjökull errichteten Top-Hat Reflektor (rechts).

bietet mit einer – bisher für zivile Zwecke nicht verfügbaren – Auflösung von bis zu 20 cm beste Voraussetzungen für das Experiment.

Unmittelbar nach dem Aufstellen der Reflektoren konnten diese aufgrund ihrer starken Rückstreuwerte in den Staring Spotlight Testaufnahmen identifiziert werden (Abb. 6). Mit einer Zeitreihe von Staring Spotlight Daten ist es somit möglich, Veränderungen ihrer absoluten Lage auf dem Gletscher zu verfolgen. Die Top-Hat Reflektoren werden als doppelte „Lichtpunkte“ abgebildet; vermutlich handelt es sich um eine Reflexion der Reflektor Ober- und Unterseite. Mit Hilfe eines kontinuierlichen „Doppelsignals“ könnten somit Schmelzraten bestimmt werden. Detaillierte Analysen werden zusammen mit weiteren Staring Spotlight Aufnahmen ab dem Frühjahr 2014 durchgeführt. Außerdem wird eine Korrelation der Daten mit den GPS Messungen stattfinden, sobald die Speicherkarten der GPS Stationen im März 2014 ausgetauscht wurden.

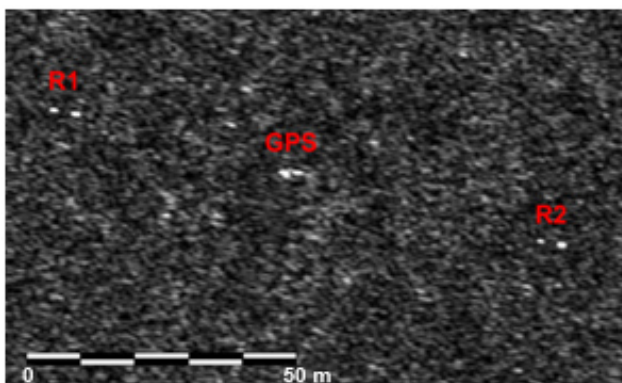


Abb. 6. Ausschnitt einer Staring Spotlight Szene vom 25.08.2013 zeigt die GPS Station (GPS) und die beiden Top-Hat Reflektoren (R1, R2) als pixelgenaue, helle Rückstreuwerte (© DLR).

4.3. TanDEM-X Analysen

Ein TanDEM-X RawDEM wird durch interferometrische Prozessierung aus jeweils einem Bildpaar erstellt. Somit können tatsächliche Geländehöhen zum Aufnahmezeitpunkt gemessen werden. Datenlücken entstehen in steilen Geländebereichen, wo es aufgrund der side-looking Aufnahmegeometrie von SAR-Systemen zu Abschattung kommt. Eine absolute Höheneinpassung der verschiedenen Geländemodelle erfolgt mit Hilfe von Corner-Reflektoren, die 1995 im Zuge eines ESA ERS1/2 Projektes (PI U. Münzer) im Bereich des Mýrdalsjökull aufgestellt wurden.

Es ist bisher noch nicht bekannt wie sich eine mögliche Interaktion der X-Band Radarstrahlen mit der Gletscheroberfläche auf die Höhenmodelle auswirkt. Daher ist eine Verifizierung mit anderen, hochauflösenden Geländedaten sehr wichtig. Ein Vergleich von LiDAR Daten vom 7. August 2011 mit einer TanDEM-X Szene vom 4. September 2011 zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung der beiden Datensätze im Bereich der Eisdepressionen vom Juli 2011 (Abb. 7). Es konnte jeweils eine Tiefe der westlichen Depression von 140 m festgestellt werden. Somit ist es künftig möglich die TanDEM-X Höhendaten in die Prozesskette zur automatischen Detektierung von Eisdepressionen zu integrieren sowie für Untersuchungen des Massenhaushaltes von Gletschern zu verwenden.

Abbildung 8 zeigt eine Differenzbild-Analyse von TanDEM-X Daten aus dem Spätsommer 2011 bzw. Sommer 2012. An beiden Aufnahmetagen waren die unteren Gletscherbereiche schneefrei und die oberen Bereiche mit nassem Schnee bzw. Firn bedeckt. Blau eingefärbte Bereiche in Abbildung 8 bedeuten einen Höhen- bzw. Volumenzuwachs, während rote Bereiche auf dem Gletscher vorwiegend Eisschmelze darstellen. Kleinere rote Bereiche auf dem Eisplateau zeigen die Bildung von Depressionen. Deutlich erkennbar ist die Entwicklung der Eisdepressionen, die sich im Zuge des Gletscherlaufs vom 9. Juli 2011 südlich der Katla gebildet haben.

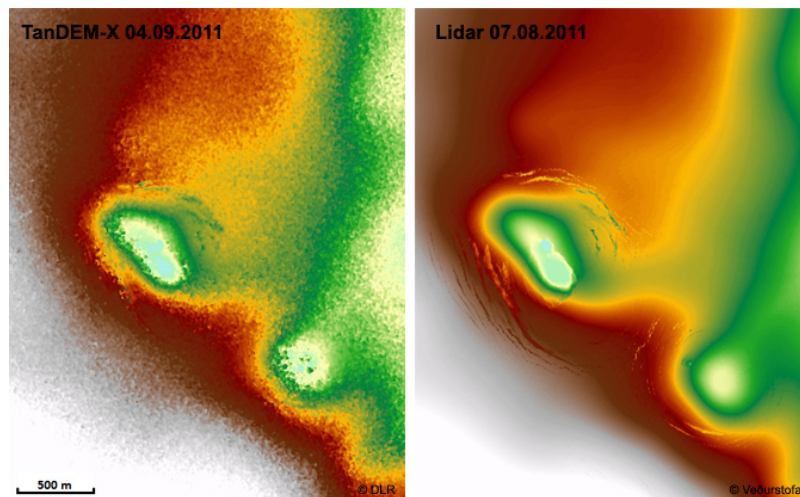


Abb. 7. Vergleich eines TanDEM-X RawDEM mit LiDAR Daten anhand der Eisdepressionen des Gletscherlaufs vom 9. Juli 2011.

Diese Depressionen sind anhand einer TerraSAR-X Zeitreihe sehr gut fernerkundlich dokumentiert. Bereits drei Tage nach dem Gletscherlauf liegt eine TSX Szene vor, die die beiden Eisdepressionen deutlich zeigt. Anschließend haben sie sich bis Mitte Oktober 2011 stetig vertieft, was durch die Bildung von Gletscherpalten am Rande der Eisvertiefungen optisch gut zu erkennen ist. Bis April 2012 wurden sie schließlich weitgehend eingeschneit sowie durch die Fließbewegung des Eises zugeschoben.

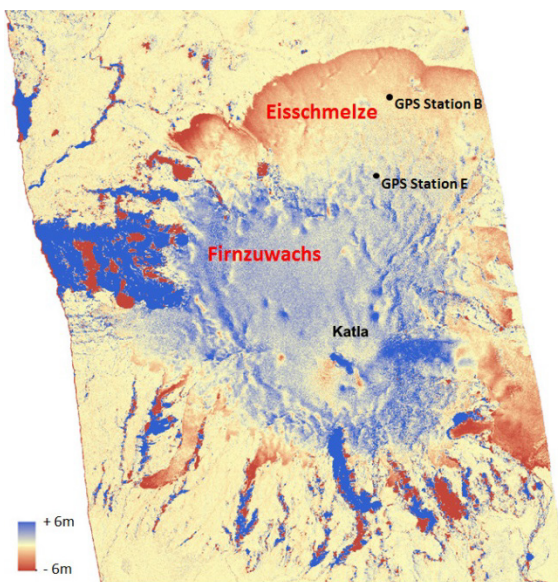


Abb. 8. TanDEM-X Differenzbild vom Myrdalsjökull, berechnet aus zwei Höhenmodellen unterschiedlicher Jahre (19.07.2012 und 04.09.2011). Hellblaue Bereiche bedeuten einen Höhenzuwachs, rote Bereiche einen Höhenverlust von 2011 nach 2012. Großflächig tief blaue bzw. rote Flächen, vorwiegend im Süden und Westen des Myrdalsjökull, sind Artefakte in steilem Gelände und an Wasserflächen.

4.4. 3D Visualisierung

Auf der Basis eines RapidEye Mosaiks, bestehend aus 267 Bildkacheln (s. Abb. 1), und eines digitalen Geländemodells mit 20 m räumlicher Auflösung wurde im Rahmen von IsViews ein 3D Modell von ganz Island erstellt. Das Geländemodell basiert auf der Kompilierung verschiedener Datenquellen wie topografische Karten 1:25.000 und 1:50.000, photogrammetrische Luftbilder, LiDAR Daten, Radardaten sowie SPOT und ASTER Satellitendaten und hat eine Höhengenaugigkeit von 50 cm bis 20 m. Die RapidEye Bildkacheln aus den Jahren 2011 bis 2013 wurden aufgrund unterschiedlicher Landbedeckung einzeln farbkorrigiert und aneinander angepasst. Das 3D Modell ist eingebettet in einen von der Firma 3D RealityMaps entwickelten 3D Viewer und erlaubt das Einbinden von zusätzlichen Bildlayern sowie jeglicher Geodaten.

Bisher wurden höchstauflösende HRSC Luftbilder der Untersuchungsgebiete aus dem Jahr 2006, Geodaten vom National Land Survey of Iceland (z.B. Ortsnamen), ortsbezogene Fotos der Geländearbeiten sowie erste Projektergebnisse (z.B. Rückgang der Gletscherfläche des Myrdalsjökull, TanDEM-X Differenzbilder) integriert. Abbildung 9 zeigt einen screenshots des 3D Viewers vom Sléttjökull.

Das 3D Visualisierungsverfahren wurde entwickelt um die Projektergebnisse wirksam darzustellen und um verschiedene Szenarien von Naturgefahren zu simulieren. Die Software erlaubt eine detaillierte Ausweisung von Gefahrenzonen und kann somit eine Entscheidungshilfe bei der Ausarbeitung von Evakuierungsplänen darstellen.

Um dieses einzigartige 3D Visualisierungs-Produkt und vorläufige Ergebnis des Projektes IsViews einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde ein Video erstellt, das einen „Flug“ durch die 3D Karte zeigt. Dieses Video ist online verfügbar unter <http://vimeo.com/71823956> oder auf der Webseite der RSS GmbH (www.rssgmbh.de).



Abb. 9. Screenshot des 3D Viewers mit der Darstellung von ortsbezogenen Fotos (Aufstellung der GPS Station am Sléttjökull auf 1100 m) (© RSS GmbH).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die hervorragende Basis von hochaufgelösten multi-temporalen und multi-source Fernerkundungsdaten sowie aktueller in situ Daten zusammen mit den ersten, vielversprechenden Ergebnissen zeigt das große Potential des Projektes IsViews.

Eine umfangreiche GIS-Datenbank wird kontinuierlich durch TerraSAR-X Szenen verschiedener Aufnahmemodi, optische RapidEye Daten, TanDEM-X Höhenmodelle sowie Seismik- und Wetterdaten erweitert. Die gut dokumentierte Entwicklung der Eisdepressionen am Mýrdalsjökull im Zuge des Gletscherlaufs vom 9. Juli 2011 stellt ein ausgezeichnetes Fallbeispiel für Untersuchungen im Hinblick auf den Aufbau eines Frühwarnsystems dar. Außerdem kann das Fließverhalten des Gletschers anhand des ausgeprägten Aschebandes am Sléttjökull Auslassgletscher fernerkundlich genau studiert werden.

Im Projekt wird die Gletscheroberfläche mittels *feature tracking* Methoden und automatischer Bilderkennung analysiert. Verifiziert werden die Fernerkundungsdaten durch zwei permanente GPS Stationen und mehrere Holzpegel, die im Zuge der Feldarbeiten im Sommer 2013 am Sléttjökull installiert wurden. Sobald im Frühjahr 2014 der Gletscher wieder begehbar ist, voraussichtlich Mitte März, werden die Speicherkarten der GPS Stationen ausgetauscht und die Längen der Pegel über der Schneeoberfläche gemessen.

Die GPS Daten sind ebenso wichtig, um die Ergebnisse des Top-Hat Experiments im Detail zu interpretieren. Aufgrund der erfolgreichen Identifizierung der Top-Hat Reflektoren in den experimentellen TerraSAR-X Staring Spotlight Szenen des Sléttjökull, wird es ab dem Frühjahr 2014 weitere Aufnahmen für das IsViews Projekt geben. Die kostengünstige und einfache Handhabung dieser innovativen Reflektoren kombiniert mit den höchstauflösten TSX Daten eröffnet ganz neue Monitoring Möglichkeiten, nicht nur von Gletscher-

veränderungen sondern auch bei der Überwachung von Gesteinsbewegungen und Gebäudedeformationen.

Ein weiteres positives Projektergebnis stellt die Analyse der bisher sieben TanDEM-X Höhenmodelle des Mýrdalsjökull dar. Ein Vergleich der RawDEMs mit nahezu zeitgleichen LiDAR Daten zeigt eine hohe Übereinstimmung der beiden Datensätze. Erste Differenzbilddanalysen demonstrieren, dass es mit den TanDEM-X Daten möglich ist Eisschmelze und Firnzuwachs sowie die Bildung von Depressionen in der Gletscheroberfläche zu identifizieren. Detaillierte Untersuchungen werden mit Hilfe der σ_0 Werte und vorliegenden Wetterdaten gemacht. Ein weiteres Projektziel ist es, einen Algorithmus zur automatischen Detektion von Eisdepressionen anhand der TanDEM-X Höhenmodelle zu entwickeln.

Im Hinblick auf operationelle Copernicus Dienste werden die Projektergebnisse in eine benutzerfreundliche, hochaufgelöste 3D Visualisierungsumgebung integriert. Momentan wird der 3D Viewer intern für die Analyse und Auswertung von Daten verwendet. Er ist jedoch internetbasiert und kann somit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Nationaler Nutzerbedarf eines Frühwarnsystems besteht beispielsweise im Hinblick auf die Ausweisung von Gefahrenzonen sowie möglicher Evakuierungsmaßnahmen. Auf internationaler Ebene ist die Überwachung von subglazialen Vulkanen für Fluggesellschaften und Rückversicherer von großer Bedeutung.

Der Vulkanausbruch am Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 hat aufgrund der Behinderung des europäischen Flugverkehrs durch Vulkanasche gezeigt, dass internationaler Handlungsbedarf für eine Frühwarnung derartiger Ereignisse zusammen mit einem verbesserten Krisenmanagement besteht. Das Projekt IsViews demonstriert, dass es möglich ist mit innovativen Fernerkundungstechnologien und 3D Visualisierung ein near-real time Monitoringsystem zur Früherkennung von erneuten subglazialen Vulkanausbrüchen in Island aufzubauen.

Danksagung

Besonderer Dank geht an das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie für die finanzielle Förderung des Projektes IsViews.

Der Firma BlackBridge AG (ehemalig RapidEye AG) wird gedankt für die Lieferung zahlreicher, sehr wertvoller RapidEye Satellitenbilder im Rahmen des Proposals DLR/RESA ID 619. Besondere Erwähnung verdient das Meteorologische Institut Islands (Veðurstofa) für die Bereitstellung von LiDAR Höhenmodellen, Wetterdaten und seismischen Daten. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Planetenforschung, hat dem Forschungsprojekt IsViews großzügig HRSC Daten aus einer Befliegungskampagne in Island im Jahr 2006 zur Verfügung gestellt.

Ein herzliches Dankeschön verdienen Christof Völksen und Torsten Spohnholz von der Kommission für Erdmessung und Glaziologie, Bayerische Akademie der Wissenschaften, für die Entwicklung und das Bereitstellen der permanenten GPS Stationen. Ebenso wird Ágúst Hálfánsson für die wertvolle Mithilfe bei den glaziologischen Feldarbeiten und die Bereitstellung eines zweiten Gasdampfdruckbohrers gedankt.

Literatur

- Björnsson, H., Pálsson, F. und Guðmundsson, M. T., 2000: Surface and bedrock topography of Mýrdalsjökull ice cap, Iceland: The Katla caldera, eruption sites and routes of jökulhlaups. *Jökull*, **49**, S. 29-46.
- Björnsson, H., Rott, H., Guðmundsson, S., Fischer, A., Siegel, A. und Guðmundsson, M. T., 2001: Glacier-volcano interactions deduced by SAR interferometry. *Journal of Glaciology*, **47** (156), S. 58-70.
- Björnsson, H., 2002: Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, **35**, S. 255-271.
- Guðmundsson, M. T., Elíasson, J., Larsen, G., Gylfason, Á. G., Einarsson, P., Jóhannesson, T., Hákonardóttir, K. M. und Torfason, H., 2005: Yfirlit um hættu vegna eldgosa og hlaupa frá vesturhluta Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökli. In: Þorkelsson, K. (Hrsg.) *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*, Ríkislögreglustjórn, S. 11-44.
- Guðmundsson, M. T., Högnadóttir, P., Kristinsson, A. B. und Guðbjörnsson, S., 2007: Geothermal activity in the subglacial Katla caldera, Iceland, 1999-2005, studied with radar altimetry. *Annals of Glaciology*, **45**, S. 66-72.
- Guðmundsson, M. T., Pedersen, R., Vogfjörð, K., Thorbjarnardóttir, B., Jakobsdóttir, S. und Roberts, M. J., 2010: Eruptions of Eyjafjallajökull Volcano, Iceland. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **91** (21), S. 190-191, DOI: 10.1029/2010EO210002.
- Jaenicke, J., Mayer, C., Scharrer, K., Münzer, U. und Guðmundsson, Á., 2006: The use of remote-sensing data for mass-balance studies at Mýrdalsjökull ice cap, Iceland. *Journal of Glaciology*, **52** (179), S. 565-573.
- Jóhannesson, T., Björnsson, H., Magnússon, E., Guðmundsson, S., Pálsson, F., Sigurðsson, O., Thorsteinsson, TH. und Berthier, E., 2013: Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Annals of Glaciology*, **54** (63), S. 63-74.
- Knudsen, Ó., Jóhannesson, H., Russell, A. J. und Haraldsson, H., 2000: Changes in the Gígjukvísl river channel during the November 1996 jökulhlaup, Skeiðarársandur, Iceland. *Jökull*, **50**, S. 19-32.
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. und Matthias, V., 2012: Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010. *Atmospheric Environment*, **48**, S. 1-8.
- Larsen, G., 2000: Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull*, **49**, S. 1-27.
- Münzer, U., Mayer, C., Reichel, L., Runge, H., Fritz, T., Rossi, C. und Guðmundsson, Á., 2010: NRT-Monitoring am Vulkanausbruch Eyjafjallajökull (Island) mit TerraSAR-X. *PFG*, **5**, S. 339-354, DOI: 10.1127/1432-8364/2010/0060.
- Roberts, M. J., 2005: Jökulhlaups: A reassessment of floodwater flow through glaciers. *Reviews of Geophysics*, **43**, RG1002, S. 1-21, DOI: 10.1029/2003RG000147.
- Sæmundsson, K., 1979: Outline of the geology of Iceland. *Jökull*, **29**, S. 7-28.
- Scharrer, K., Spieler, O., Mayer, C. und Münzer, U., 2007: Imprints of sub-glacial volcanic activity on a glacier surface - SAR study of Katla volcano, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, **70**, S. 495-506, DOI: 10.1007/s00445-007-0164-z.
- Schmincke, H.-U., 2000: *Vulkanismus*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Thorbjarnardóttir, B., Guðmundsson, G. B., Hjaltadóttir, S. und Roberts, M. J., 2007: Seismicity in Iceland during 2006. *Jökull*, **57**, S. 45-59.
- Tómasson, H., 1996: The Jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, **22**, S. 249-254.