



NRT-Monitoring am Vulkanausbruch Eyjafjallajökull (Island) mit TerraSAR-X

ULRICH MÜNZER, CHRISTOPH MAYER, München, LUTZ REICHEL, Maisach, HARTMUT RUNGE, THOMAS FRITZ, CRISTIAN ROSSI, Oberpfaffenhofen & ÁGÚST GUDMUNDSSON, Kópavogur, Island

Keywords: TerraSAR-X, Vulkanismus, NRT-Monitoring, Gletscherlauf, Island

Summary: *NRT-Monitoring of the Eyjafjallajökull volcanic eruption (Iceland) with TerraSAR-X.* Natural disaster monitoring in Iceland, based on remote sensing data is performed by the group of geological remote sensing at the University of Munich for the space agencies ESA, NASDA/JAXA and CSA since 1992. This will be an important contribution by remote sensing techniques for the early warning and monitoring of natural disasters. The recent volcanic eruptions of the Fimmvörduháls (20.3.–12.4.2010) and beneath Eyjafjallajökull (since 14.4.2010) were the motivation for acquiring a series of TerraSAR-X scenes covering the volcanoes. This new satellite generation with its different beam modes and the additional option of rotation of the satellite from right looking to left looking mode allows an almost daily coverage of the active region in Iceland. This high frequent time series allowed a detailed investigation of the impact of the volcanic activities on the ice cover. For the first time, also a glacier outburst flood (jökulhlaup: massive flood originating from melted glacier ice) could be covered by the image (15.4.2010). The flow velocities of this flood have been determined by Doppler-frequency measurements. Our study shows that the very fast data availability from TerraSAR-X enables an NRT-monitoring for observing natural processes.

Zusammenfassung: Aufbauend auf die seit 1992 durchgeführten Fernerkundungsprojekte zum Katastrophen-Monitoring in Island für die Weltraumorganisationen ESA, NASDA/JAXA, CSA wird mit den TerraSAR-X Satellitendaten (Projekt DLR ID GEO0100) ein Near-Real-Time (NRT) – Monitoring zur Überwachung subaerischer und subglazialer Vulkane in der Neovulkanzone Islands entwickelt. Dadurch soll ein wichtiger fernerkundlicher Beitrag zur Früherkennung von Naturkatastrophen und deren Überwachung geleistet werden. Aktueller Anlass für die Aufnahme einer Datenreihe mit TerraSAR-X war der Vulkanausbruch am Fimmvörduháls (20.3.–12.4.2010) und dem kurz darauf folgenden Ausbruch am Eyjafjallajökull (14.4.2010). Die neue Satellitengeneration des TerraSAR-X ermöglicht mit den unterschiedlichen Beam-Modes und zusätzlichem Drehen des Satelliten vom Right Looking Mode in einen Left Looking Mode eine nahezu tägliche Datenaufnahme für Island und damit eine zeitlich sehr detaillierte Untersuchung des Einwirkens von vulkanischer Aktivität auf die Eisbedeckung. Erstmals konnte auch ein Gletscherlauf (isl. Jökulhlaup; Schmelzwasserflut durch vom Vulkan abgeschmolzenes Gletschereis), mit einer Stripmap-Szene einen Tag (15.4.2010) nach dem subglazialen Vulkanausbruch erfasst und die Fließgeschwindigkeit durch eine Doppler-Frequenz-Messung berechnet werden. Unsere Studie zeigt, dass die sehr schnelle Datenverfügbarkeit beim TerraSAR-X ein NRT-Monitoring zur Überwachung von Naturereignissen ermöglicht.

1 Einleitung

Island ist der zentrale Bereich des aseismischen Island-Färö-Rückens und liegt am modellhaft symmetrischen Reykjanes-Segment des Mittelatlantischen Rückens (EISBACHER

1991). Die topographische Erhebung der ca. 103.000 km² großen Insel über die normale Tiefenlage dieses Rückens ist auf die Kombination eines Asthenosphären diapires mit der

Aufstiegszone eines tiefer gelegenen Hotspots zurückzuführen (JAKOBSSON 1979, PÁLMASSON 1986). Dadurch wurde die magmatische Tätigkeit verstärkt und das Volumen an extrudierten Laven wesentlich erhöht. Gegenüber den recht einförmigen tholeiitischen mittelozeanischen Rückenbasalten zeichnet sich der über dem Meeresspiegel gelegene Festanteil von Island durch eine größere Varietät an Gesteinstypen aus. 80–85 % der Gesteine sind Tholeiite, Übergangs-Alkalibasalte und Alkalibasalte, ca. 10 % besitzen einen sauren bis intermediären Chemismus und die Anteile der Sedimente vulkanischen Ursprungs betragen etwa 5–10 % (SAEMUNDSSON 1979). Die Riftzone durchzieht Südisland mit zwei nahezu parallel versetzten Zweigen (Westliche Vulkan Zone u. Östliche Vulkan Zone) in SW-NE Richtung. Verbunden ist diese Riftzone durch eine ca. 70–80 km lange Transform-Fault (South Iceland Seismic Zone SISZ) mit starker

seismischer Aktivität bis M 7 (EINARSSON et al. 1981, HJALTADÓTTIR et al. 2005). Im Zentrum Islands vereinen sich diese beiden Riftzonen und setzen sich S-N streichend bis zur Atlantikküste Nordislands fort.

Diese sog. Neovulkanische Zone nimmt rund 35.000 km², etwa ein Drittel der Fläche Islands ein. Seit dem Ende der letzten Eiszeit waren schätzungsweise 200 Vulkane aktiv mit einer Magmenförderung von 400–500 km³. Seit der Besiedelung Islands vor 1.140 Jahren betrug die Lavaproduktion aus 30 Vulkansystemen ca. 40 km³, wobei der Anteil basischen Materials bei 70 %, intermediären bei 23 % und sauren bei 7,5 % liegt (SAEMUNDSSON 1979, JAKOBSSON 1979).

Zurzeit sind 11.048 km², d. h. ca. 10 % der Landfläche Islands vergletschert. Europas größte geschlossene Eisfläche ist der Plateaugletscher Vatnajökull (8.086 km²), gefolgt vom Langjökull (929 km²), Hofsjökull

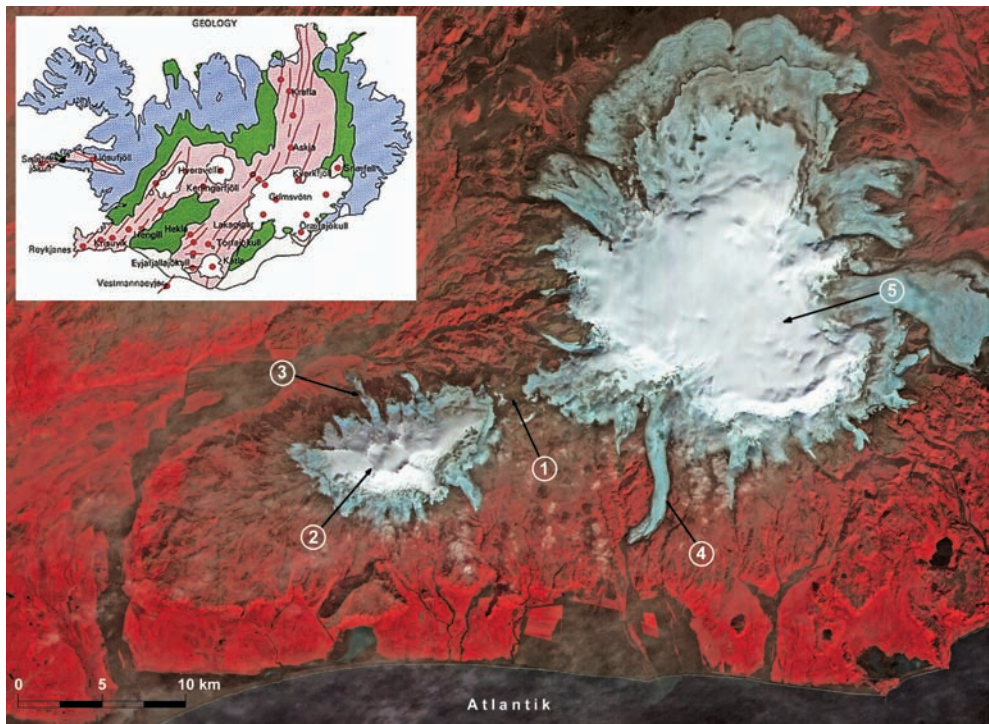


Abb. 1: ASTER Bildausschnitt (RGB Kanal 3,2,1) vom 23.9.2004 mit dem Mýrdalsjökull (596 km²) und Eyjafjallajökull (80 km²) sowie geologischer Übersichtskarte Islands (www.nordvol.hi.is) © NASA. Ausbruchsstelle: ① Fimmvörduháls, ② Eyjafjallajökull; Gletscherzunge: ③ Gigjökull, ④ Sólheimajökull; Subglazialer Vulkan: ⑤ Katla.

(889 km²), Mýrdalsjökull (596 km²), Drangajökull (146 km²) und Eyjafjallajökull (80 km²) sowie kleineren Kargletschern im Norden und vergletscherten Einzelvulkanen (SIGURDSSON 1992, 1998, 2005). Auch unter den Gletschern gibt es, ausgelöst durch seismische Aktivitäten, gewaltige subglaziale Ausbrüche. Mit über 20–30 Eruptionen zählt die Grímsvötn (Vatnajökull) mit ihren Gletscherläufen (isl. Jökulhlaup) zu den aktivsten Vulkanen. Ihre letzten Ausbrüche waren 1922, 1934, 1938, 1982, 1983, 1998 und zuletzt 2004. Der folgenschwerste Ausbruch war in letzter Zeit an der Gjalp (1996), nur wenige Kilometer nördlich der Grímsvötn gelegen. Während eines kurzfristigen Gletscherlaufs verwüsteten ca. 3,4 km³ Schmelzwasser mit einem Abfluss von 53.000 m³/s das periglaziale Vorland im Süden Islands (BJÖRNSSON 1988, ADALGEIRSDÓTTIR 2003, MAGNUSSON et al. 2005, GUDMUNDSSON et al. 1997, 2003, MÜNZER et al. 2000, 2001, 2003). Unter dem Eis des Mýrdalsjökull liegt der Zentralvulkan Katla. Der letzte verheerende Ausbruch war im Jahr 1918 mit einem gewaltigen Gletscherlauf (> 300.000 m³/s).

Derzeit letzter Vulkanausbruch in Island fand am 20.3.–12.4.2010 am Fimmvörduháls statt, einem Bergrücken zwischen dem Mýrdals- und Eyjafjallajökull, und kurz danach begann am 14.4.2010 der Ausbruch am Eyjafjallajökull, nur 8 km westlich der ersten Ausbruchsstelle gelegen (Abb. 1). Die vulkanische Aktivität ist wahrscheinlich am 24.5.2010 abgeschlossen, obwohl eine seismische Aktivität weiterhin vorhanden ist.

2 NRT-Monitoring mit TerraSAR-X

Der TerraSAR-X wurde am 15. Juni 2007 als erster deutscher Radarsatellit für die Erdbeobachtung vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur gestartet. Er wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben. Nach der Kalibrierungsphase nahm TerraSAR-X seinen operationellen Betrieb im Januar 2008 auf. Der Satellit umkreist die Erde in einer 514 km hohen, nahezu polaren Umlaufbahn (Inklination 97,44°) und fliegt in einem sog. sonnensynchronen, dusk-dawn Orbit. Das bedeutet, dass der Satellit entlang

der Tag-Nacht-Grenze fliegt und der Sonne immer die gleiche Seite zuwendet. Dies dient insbesondere einer optimalen Energieversorgung durch die Solarzellen.

TerraSAR-X nutzt für die Aufnahme von hochauflösenden Radardaten der Erdoberfläche ein Synthetik Aperture Radar (SAR), das aktiv Radarimpulse im X-Band (Wellenlänge 3,1 cm, Frequenz 9,65 GHz) abstrahlt und das von der Erdoberfläche reflektierte Radarecho wieder mit seiner Antenne empfängt und aufzeichnet.

Die Wiederholrate des TerraSAR-X beträgt 11 Tage, d. h. er erreicht nach jeweils 11 Tagen wieder seine ursprüngliche Position bzw. Orbit. Da der Satellit aber mit unterschiedlichen Blickwinkeln (Incidence Angle) arbeiten kann und unterschiedliche Aufnahmemethoden (beam modes) nutzt, ist es möglich jede Szene auf der Erde innerhalb von 2–4 Tagen (abhängig vom Breitengrad) einmal aufzunehmen. Es stehen folgende Beam Modes zur Verfügung: – Im Spotlight-Modus wird ein Gebiet von 5 bzw. 10 x 10 km Größe erfasst. Dabei wird eine max. Bodenauflösung von bis zu 1 Meter erreicht. – Im Stripmap-Mode nimmt der TS-X Streifen von 30 km Breite mit einer max. Länge von 1.500 km (Szenengröße 30 x 50 km) und einer Auflösung von 3 m auf. – Im ScanSAR-Mode wird ein Streifen von 100 km Breite und max. 1.500 km Länge (Szenengröße 100 x 150 km) mit einer Auflösung von 18 m abgetastet. Zusätzlich kann auch mit verschiedenen Polarisierungen aufgenommen werden. Gesteuert wird der TerraSAR-X vom Bodenkontrollzentrum in Oberpfaffenhofen bei München. Die aufgenommenen Daten werden in einem Onboard-Speicher abgelegt und können über mehrere Datenempfangsstationen zum Boden übertragen werden. Das so genannte TerraSAR-X „Payload Ground Segment (PGS)“ des DLR übernimmt die Archivierung, die Prozessierung, die Datenbestellabwicklung und die Auslieferung der Daten. Wissenschaftliche Kunden werden direkt vom DLR bedient; kommerzielle Kunden werden von der EADS Astrium-Tochter Infoterra GmbH betreut, die am TerraSAR-X über ein so genanntes Public-Private-Partnership beteiligt sind. (DLR-Missionsbroschüre TerraSAR-X_D-GB Juli 2009).

Über das Datenkontingent des Projektes „Monitoring of glaciovolcanic interactions in Iceland utilizing TerraSAR-X – Continuation and enhancement of the existing SAR-based hazard observation“, DLR ID: GEO0100 PI: U. MÜNZER, wurden zur Überwachung des Vulkanausbruchs des Eyjafjallajökulls im Zeitraum vom 20.3.2010 bis 19.5.2010 für unsere Untersuchungen 17 Stripmap-Szenen, 3 ScanSAR-Szenen sowie 1 Spotlight Szene (alle in HH Polarisation) über das EOWEB-Portal des DLR bestellt und abgerufen. Bedingt durch die gewaltige Eruption des Eyjafjallajökull (14.4.2010) wurde sofort am 15.4.2010 morgens um 9:32 Uhr eine Stripmap-Szene für den gleichen Tag (Aufnahmezeit 19:34 Uhr, ascending path) in enger Zusammenarbeit mit dem DLR bestellt und programmiert. Am 16.4.2010 um 4:53 Uhr früh war die Szene als EEC-Basisprodukt (Enhanced Ellipsoid Corrected) bereits ausgeliefert, d. h. knapp 10 Stunden nach der Aufnahme. Dabei wurde die Standardprozessierungskette durchlaufen und kein gesonderter Near-Real-Time (NRT) Rechner genutzt.

Durch die subpolare Lage von Island sind dort nahezu tägliche Aufnahmen möglich. An einigen Tagen des 11-Tage Wiederholzyklus sind sogar zwei Datenakquisitionen pro Tag möglich (ascending und descending path). Dies wurde bei unserem Monitoring genutzt. Bei der notwendigen lückenlosen Zeitserie zur Überwachung der Vulkane wurden auch Aufnahmen außerhalb des zulässigen Incidence Winkels von 20° – 45° für Stripmap-Szenen sowie auch für kurze Zeit der Left-Looking Mode aktiviert. Dabei dreht sich der Satellit um seine Längsachse, um die Radar-Antenne vom standardmäßigen Right-Looking Mode auf Left Looking Mode auszurichten. Dieses Manöver kann nur in Ausnahmefällen vom DLR durchgeführt werden, da es den operationellen Betrieb des Satelliten einschränkt.

3 Vulkanausbruch am Fimmvörduháls (20.3.–12.4.2010) und Eyjafjallajökull (14.4.2010–?)

Der Eyjafjallajökull-Vulkankomplex mit dem Godasteinn als höchste Erhebung (1.666 Meter über mittlerer Meereshöhe (M. ü. m. M.)

befindet sich im östlichen Zweig der Riftzone Südislands. Rund 80 km^2 Fläche sind derzeit mit Gletschereis bedeckt (SIGURDSSON 2005). Während des letzten Ausbruchs (1821–1823) entstand am Gipfel des Vulkanstocks eine elliptisch ausgerichtete Caldera mit einem Durchmesser von ca. $2,6 \text{ km}$ und $4,3 \text{ km}^2$ Fläche (aus TerraSAR-X Daten). Die Eismächtigkeit ist bis zu 200 m stark (GUDMUNDSSON & HÖGNARDÓTTIR 2005). Nur einzelne Spitzen der subglazialen Caldera ragen derzeit mit einer Höhe von 1.571 – $1.666 \text{ M. ü. m. M.}$ aus dem Eis heraus. Nach Norden hin ist die Caldera geöffnet. Hier zieht sich die Gletscherzunge des Gígjökull (Fläche $3,2 \text{ km}^2$, Länge $3,8 \text{ km}$, Breite $0,7$ – $1,0 \text{ km}$) bis auf 175 M. ü. m. M. talwärts und endet in einem von Seiten- und Endmoränen eingebetteten Eisrandsee (Fläche $0,65 \text{ km}^2$, max. Breite 750 m , max. Länge 1.150 m aus TSX-Szene 20.3.2010) mit einem Abfluss in die Krossá und Markarfljót (Abb. 2).

Mit kurzen Zeitabständen gab es zwei Vulkanausbrüche, den kleineren am Fimmvörduháls (20.3.2010) und den durch die enormen



Abb. 2: Kartenausschnitt vom Eyjafjallajökull-Vulkankomplex (M = 1:175.000); © LMI/Fixlanda ehf.

phreatischen Ascheauswürfe (geschätztes Fördervolumen $0,3 \text{ km}^3$) nun bekannten am Eyjafjallajökull (14.4.2010 mit vermutlichen Ende am 24.5.2010). Beide Vulkane liegen in E-W Richtung nur 8 km voneinander entfernt (Abb. 5). Nur am Eyjafjallajökull spielte das abgeschmolzene Gletschereis eine wesentliche Rolle bei dem Vulkanereignis. Beim Fimmvörduháls lag die Eruptionsstelle ($63^\circ 38,1' \text{ N}$, $19^\circ 36,4' \text{ W}$) in einer eisfreien Region am Bergrücken (ca. 1.040 M. ü. m. M.) zwischen dem Eyjafjallajökull und Mýrdalsjökull. Während der 24-tägigen Eruptionszeit wurde Lava (Alkali-Olivin Basalt) gefördert, die eine Fläche von $1,16 \text{ km}^2$ auf dem Plateau bedeckt (aus TSX-Szene 15.4.2010). Ein Teil der Lava floss in tief nach Norden eingeschnittene Felschluchten (Abb. 5 und 6).

Erhöhte seismische Aktivität begleitete den Beginn des Ausbruchs am Eyjafjallajökull ($63^\circ 38' \text{ N}$, $19^\circ 38' \text{ W}$) am 14.4.2010 mit einer Eruptionsphase, die am 24.5.2010 ihr bisheriges Ende fand. Die Aktualität dieses gewaltigen Ausbruchs war Anlass ein NRT-Monitoring mit einer TerraSAR-X Zeitreihe durchzu-

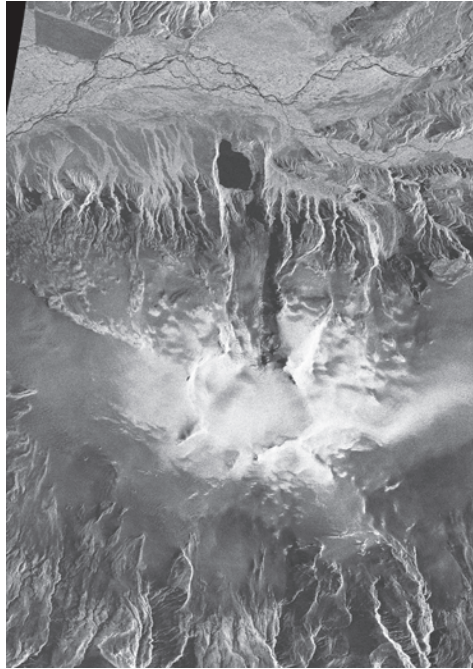


Abb. 3a: TSX Bildausschnitt vom 20.3.2010; Stripmap T125 str010R desc.; © DLR; (Bildbreite 10,34 km, Bildhöhe 14,84 km).

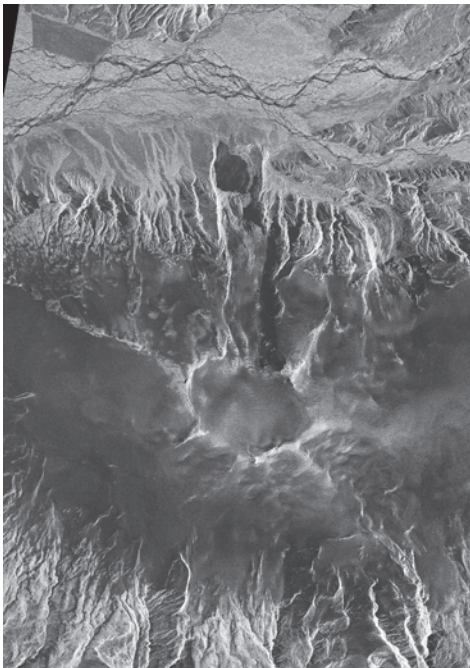


Abb. 3b: TSX Bildausschnitt vom 11.4.2010; Stripmap T125 str010R desc.; © DLR.

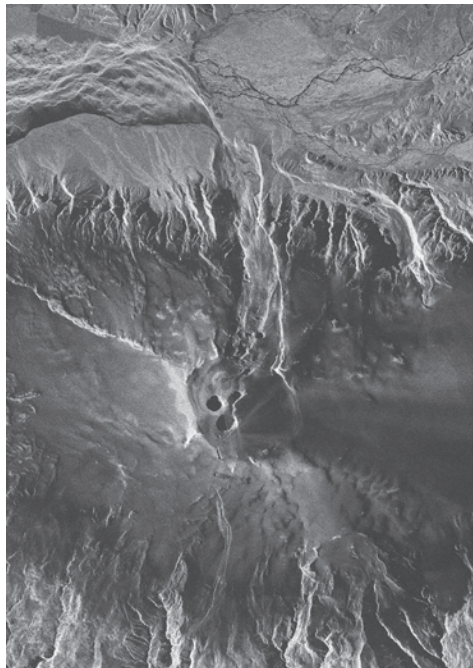


Abb. 3c: TSX Bildausschnitt vom 15.4.2010; Stripmap T26 str019R asc.; © DLR.

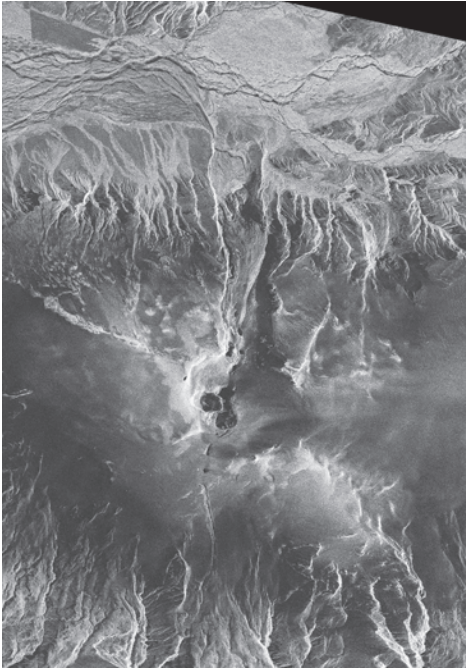


Abb. 3d: TSX Bildausschnitt vom 16.4.2010; Stripmap T34 str006R desc.; © DLR.

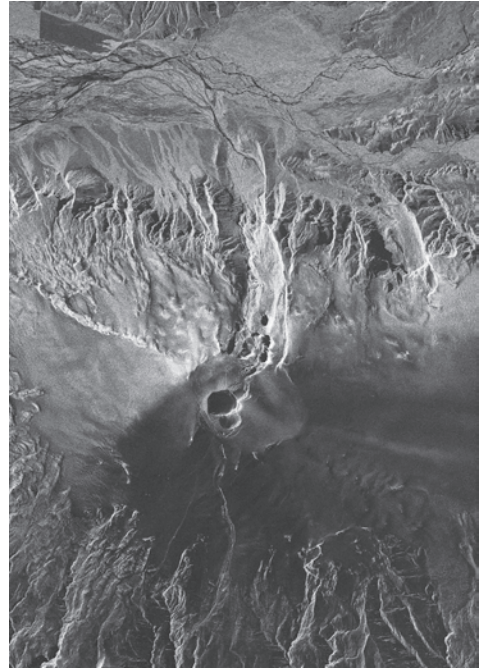


Abb. 3e: TSX Bildausschnitt vom 18.4.2010; Stripmap T65 str013R desc.; © DLR.

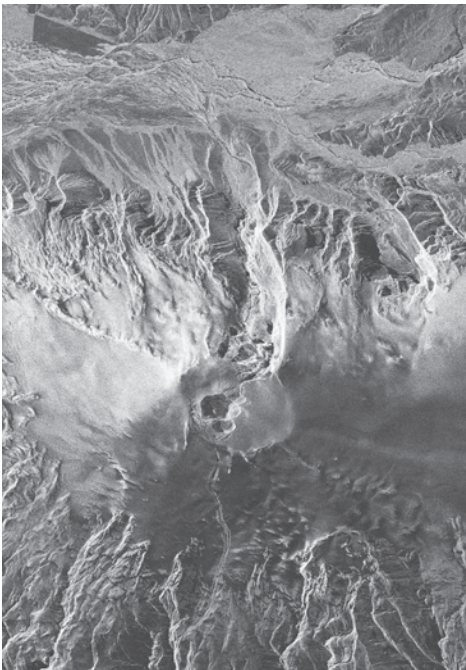


Abb. 3f: TSX Bildausschnitt vom 19.4.2010; Stripmap T80 str005L desc.; © DLR.

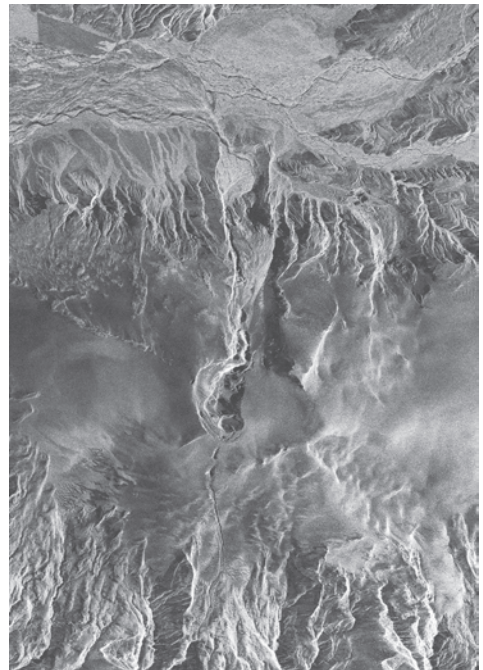


Abb. 3g: TSX Bildausschnitt vom 27.4.2010; Stripmap T34 str006R desc.; © DLR.

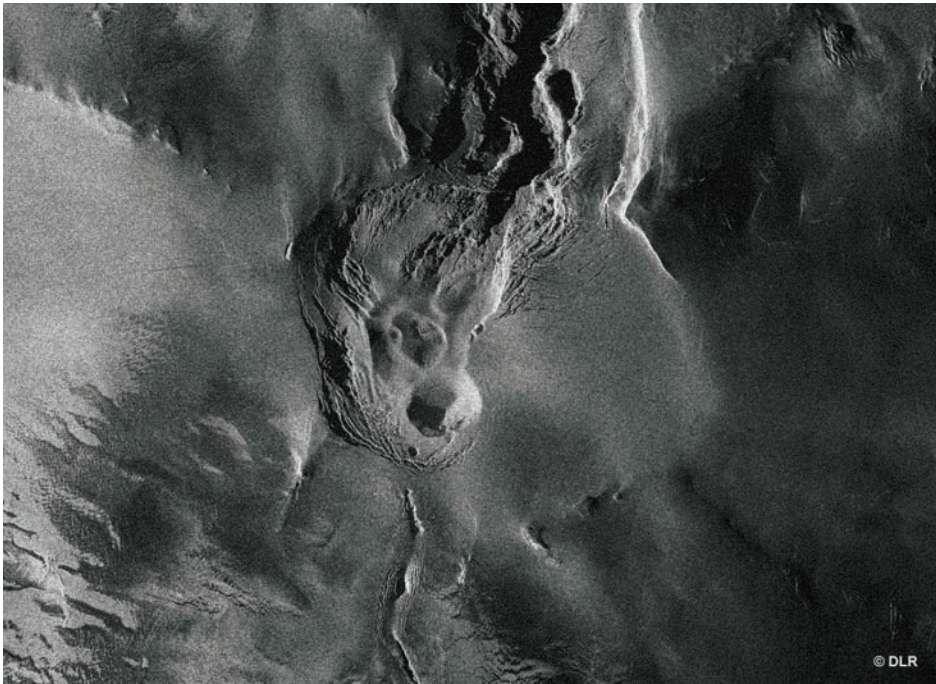


Abb. 4: TerraSAR-X-Bildausschnitt der Spotlight Szene (T26 spot087R) vom 7.5.2010, mit der subglazialen Caldera und neuen Ausbruchstellen.

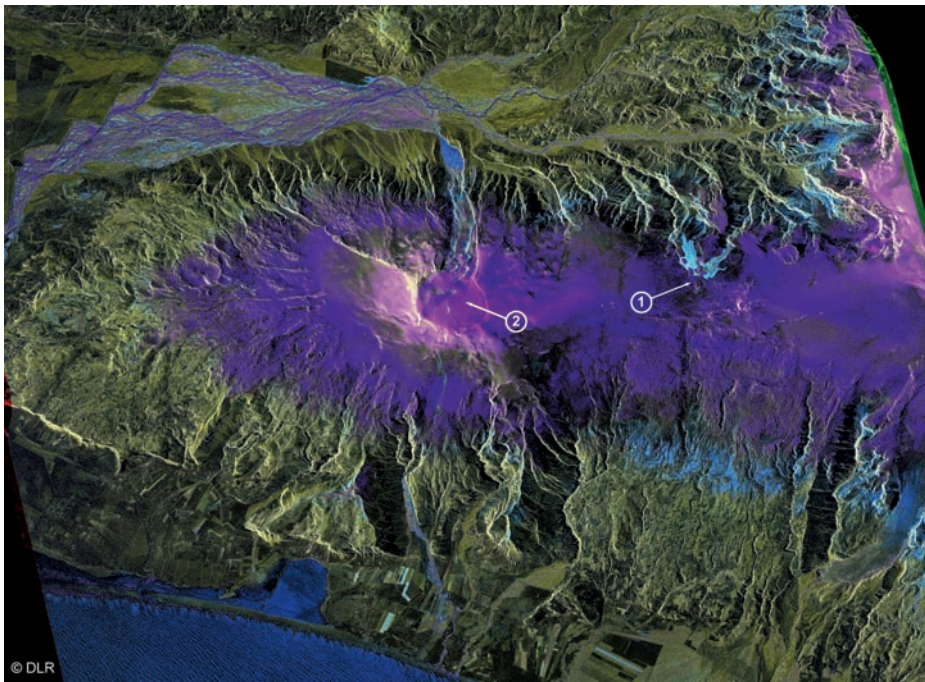


Abb. 5: Farbüberlagerung von zwei TerraSAR-X Stripmap Produkten (HH Polarisation). Rot: TS-X vom 25.3.2010 T41 str010R; Grün: TS-X vom 16.4.2010 T34 str006R; Blau: Differenz. ① Fimmvörduháls (20.3.–12.4.2010); ② Eyjafjallajökull (14.4.2010–?).



Abb. 6: Lavastrom am Fimmvörduháls in die Felsschlucht Hvannárgil vom 7.4.2010 (Blickrichtung nach S); © RAX.



Abb. 7: Vulkanausbruch am Eyjafjallajökull mit Eistunnels im Gígjökull (Aufnahme vom 19.4.2010); © RAX.

führen. Eine Auswahl von TSX Stripmap-Daten vor (Abb. 3a und 3b) und während der ersten Eruptionstage (Abb. 3c–3g) werden in flächengleichen Bildszenen vorgestellt. Schlechte Witterungsverhältnisse und gewaltige Ascheauswürfe machten in den ersten beiden Eruptionstagen eine Vorortbegehung oder Befliegung unmöglich. Mit der TSX-Szene vom 15.4.2010 war es erstmals möglich die exakte Lage der Eruptionsstelle festzustellen und entsprechende Prognosen zur weiteren vulkanischen Entwicklung bzw. Auswirkung abzugeben. Eine ca. 2,5 km lange SW-NE streichende dunkle Eisstruktur durchzieht den inneren Bereich der Caldera. Somit wird sie in einen westlichen (ca. 1,7 km²) und östlichen (ca. 2,5 km²) Bereich aufgeteilt (Abb. 3a und 3b). Die TSX-Aufnahme vom 15.4.2010 (Abb. 3c), d. h. einen Tag nach Ausbruch, zeigt, dass sich die Eruptionsstelle wie auf allen anschließenden Aufnahmen (Abb. 3e–3g) nur auf den westlichen Caldera-Bereich konzentriert

(Abb. 8). Es bildeten sich Anfangs drei gewaltige Kraterlöcher im Gletschereis mit einer Gesamtfläche von 0,3 km². Das linke Kraterloch besitzt einen Durchmesser von 340 m in E-W bzw. 360 m N-S Richtung. Die SW-NE Ausdehnung der anderen miteinander verbundenen Kraterlöcher beläuft sich sogar auf 950 m (Abb. 3c). Im Verlauf der Eruptionstätigkeit veränderten sich stetig diese Kraterlöcher (Abb. 3c–3g). Sie erreichen im Caldera-Bereich eine Fläche von z. B. 0,29 km² (Abb. 3c), 0,46 km² (Abb. 3d), 0,44 km² (Abb. 3e) bei einem max. Durchmesser von 647 m (Abb. 3e).

Den südlichen Rand der Caldera durchbricht eine ca. 1.400 m lange und 30 m breite Eisspalte mit einem ca. 2,5 km langen Schmelzwasserabfluss auf der Eisoberfläche. Dieses Spaltensystem hat sich im Verlauf der Eruption nicht wesentlich verändert und es gab keine größeren Abflussmengen in die landwirtschaftlich genutzten Gebiete.



Abb. 8: Luftaufnahme (19.4.2010) vom Eyjafjallajökull-Ausbruch mit Ascheablagerungen und dem Calderarand (\varnothing 2,6 km) vom Ausbruch 1821–1823, Blickrichtung nach SW.

Weitaus gefährlicher waren die Gletscherläufe am Tag des Ausbruchs und am 15.4.2010 am Gígjökull (Abb. 3c). Ausgelöst durch die enorme vulkanische Tätigkeit im Bereich der subglazialen Eyjafjallajökull-Caldera sind gewaltige Schmelzwasserfluten aus mehreren neu entstandenen Eislöchern im oberen Bereich des Gígjökull herausgeschossen und über dem Zungengletscher abgeflossen (Abb. 7). Der vorgelagerte, 0,65 km² große Eisrandsee, wurde komplett mit Schlamm, Sedimenten, Gesteinsmaterial und Eisblöcken verfüllt und die enormen Schmelzwasserfluten dieses Gletscherlaufs bewegten sich mit 5,2 m/s in das Flusssystem der Krossá bzw. Markarfljót (Abschnitt 4).

Während auf der Stripmap-Szene vom 20.3.2010 (Abb. 3a) die Eisbedeckung in der Caldera und an den oberen Hängen des Eyjafjallajökulls noch trockenen Schnee aufweist, ersichtlich durch den hohen Rückstreukoeffizienten (JAENICKE 2006), herrschen 3 Wochen

später schon Schmelzbedingungen auf dem gesamten Gletscher vor (Abb. 3b). Am 11.4.2010, d. h. wenige Tage vor dem Vulkanausbruch, zeichnen sich Details der Gletschermorphologie durch die Schneedecke, was darauf schließen lässt, dass die Schneedecke zumindest gut gesättigt ist. Die Gletscherzunge des Gígjökull ist noch ungestört und in der Caldera sind keinerlei Anzeichen erhöhter Aktivität zu erkennen (Abb. 3b). Nach dem Durchschmelzen der Eiskappe an der Ausbruchsstelle in der westlichen Caldera zeigt sich am 15.4.2010 ein vollständig andere Situation (Abb. 3c). Die enormen Schmelzwassermengen der subglazialen Eruption konnte nicht durch einen vertikalen Kanal im Eis nach oben transportiert werden. Daher ist es zu seitlichen Austritten des Schmelzwassers im Bereich des Durchbruchs des Gígjökull durch den Caldera-Rand gekommen (Abb. 7).

Die gesamte östliche Hälfte des Eyjafjallajökulls war bereits am 18.4.2010 von einer

Ascheschicht bedeckt, belegt durch den geringen Rückstreuoeffizienten (Abb. 3e). Die Ascheablagerungen während der gesamten Eruptionsphase werden vermutlich die Massenbilanz des Eyjafjallajökull in der kommenden Schmelzperiode deutlich beeinflussen, da die geringe Albedo einerseits die Energieaufnahme aus der Einstrahlung erhöht, eine dickere Ascheschicht andererseits die Eisschmelze durch geringere Wärmeleitung veringert (MIHALCEA et al. 2008, MAYER et al. 2006).

Erstaunlicherweise ist die östliche Hälfte der Caldera überhaupt nicht von der Eruption beeinflusst. Es bleibt eine scharfe Trennung zwischen den Eruptionsschloten im Westen und der ungestörten Schneeoberfläche im Osten. Demzufolge muss im Untergrund eine sehr scharfe räumliche Abgrenzung der Eruption gegen Osten existieren.

Augenscheinlich hat die Eruption nur sehr lokale Auswirkungen auf den Gletscher. Innerhalb der Caldera ist ein wesentlicher Teil der Eismassen verschwunden und die eisdynamischen Verhältnisse werden sich im weiteren Verlauf deutlich ändern. Der Auslassgletscher Gígjökull hat seinen Charakter vollständig verändert, da große Teile des Gletschers abgeschmolzen wurden. Es ist zu erwarten, dass auch die verbleibenden Teile des Gletschers durch die stark veränderte Geometrie noch Jahre benötigen, um zu einem neuen Gleichgewicht zu finden. Außerhalb der Caldera sind bis auf die Schmelzrinnen der Gletscherläufe oberflächlich keine dynamischen Veränderungen im Gletschereis zu erkennen. Allerdings wird die abgelagerte Asche einen deutlichen Einfluss auf die Schnee- und Eisschmelze bewirken. Der erhöhte basale Wärmefluss wird allerdings auch außerhalb der Eruptionsstellen zu höheren basalen Schmelzraten führen und damit eventuell mittelfristig die Eisdynamik des Eyjafjallajökull durch einen höheren basalen Wasserfluss verändern. Diese Reaktionen können erst in den kommenden Monaten aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden.

Die Eruptionsstelle am Eyjafjallajökull wurde für die kommenden glaziologischen Untersuchungen mit einer TSX-Spotlight Szene (7.5.2010) bei einer Bodenauflösung von 1 Meter aufgenommen (Abb. 4). Hier zeigt sich

deutlich, dass das Eis im westlichen Bereich der Caldera dynamisch reagiert. Es haben sich Spaltenbündel um die Eruptionsschlote gebildet, die auf ein weiteres Abgleiten der Eismassen ins Zentrum hin deuten. Zum Teil haben sich die Kraterlöcher mit einstürzendem Eis und Schmelzwasser verfüllt. Dieser Prozess wird mit weiteren TSX-Aufnahmen untersucht.

Ab dem 24.5.2010 wurden keine Tephra-Auswürfe am Eyjafjallajökull, sondern mehr oder weniger starke Wasserdampf-Exhalationen beobachtet. Ein definitiver Abschluss der Vulkantätigkeit ist derzeit nicht gegeben.

4 Gletscherlauf (Jökulhlaup) am Gígjökull (15.4.2010)

Ausgelöst durch den Vulkanausbruch am Eyjafjallajökull (14.4.2010) gab es in den folgenden 2 Tagen mehrere Gletscherläufe (Jökulhlaup) im nördlich der Eruptionsstelle gelegenen Flusstal Markarfljót. Der Schmelzwasserabfluss erfolgte über die ca. 1500 m steil abfallende Gletscherzunge des Gígjökull in den von Seiten- und Endmoränen eingefassten Gletschersee. Er wurde in den ersten beiden Eruptionstagen mit Gesteinsmaterial, Schlamm und Eisbruchstücken verfüllt. Am 15.4.2010 (19:05h Ortszeit) wurde dieses Gebiet vom Radar-Satelliten TerraSAR-X mit einer Stripmap-Szene aufgezeichnet. Der Gletscherlauf ist als heller Bereich im Flussbett Markarfljót zu erkennen (Abb. 3c, 9 und 10).

Die Radardaten wurden einer Frequenz-Analyse unterzogen. Tatsächlich konnte eine Doppler-Verschiebung von bis zu 260 Hz ermittelt werden, was einer Geschwindigkeit von 5,2 m/s entspricht. In Abb. 11 ist die Geschwindigkeitsmessung farbcodiert dargestellt und mit dem Radarbild überlagert.

Das Radar misst die Komponente der Geschwindigkeit des bewegten Objekts in Blickrichtung der Radarantenne. Beim weltraumgestützten SAR entspricht das in der Regel dem rechten Winkel zur Flugbewegung. Die Haupt-Fließrichtung des Gletscherlaufs im Markarfljót war bei dem aufsteigenden Satelliten-Orbit für die Doppler-Messung glücklicherweise optimal ausgerichtet. Im Bereich des Ausflusses aus dem Gletschersee ist die

Haupt-Fließrichtung des Gletscherlaufs in Flugrichtung des Satelliten. Dadurch wird die Empfindlichkeit der Doppler-Messung stark reduziert und so ist im Bereich des Gigjökull keine Fließgeschwindigkeit mehr messbar.

Die Doppler-Frequenz Methode zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit eines Gewässers wird bereits bei bodengebundenen Sensoren an Flussbrücken angewandt. Vom Weltraum aus wurden bisher nur größere Meeresströmungen (CHAPRON et al. 2005) oder große Flüsse wie die Elbe vermessen (ROSSI et al. 2010). Um ein gutes Radar Rückstreusignal zu erhalten, muss die Wasseroberfläche durch Turbulenzen oder Wind aufgeraut sein, was beim Gletscherlauf gegeben war. Die Messung einer glatten Wasseroberfläche ist nicht möglich, da die Mikrowellen in Totalreflektion vom Sensor weg gestreut werden.

Der Blickwinkel des Radars θ nach unten war um 51,14 Grad von der Senkrechten zur Seite gerichtet (der sog. „off-nadir-angle“) und die verwendete Wellenlänge λ liegt beim TerraSAR-X bei 3,1 cm. Die Geschwindigkeitskomponente v in Blickrichtung des Radars am Boden beträgt:

$$v = \frac{\lambda \Delta f_{DC}}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Mit Δf_{DC} wird die Differenz zwischen der Doppler-Frequenz vom sich nicht bewegenden Boden und von der Strömung angegeben, und durch blockweise Messung in den Daten ermittelt. Der Mittelwert beträgt 235 Hz mit Spitzenwerten um 260 Hz. Damit ergibt sich für diesen Streckenabschnitt eine mittlere Geschwindigkeit des Gletscherlaufs von 4,7 m/s. Das Gefälle auf diesem Streckenabschnitt beträgt rund 10 m auf 1 km.

Die Doppler-Frequenz-Messung wird mit Hilfe der SAR Daten durchgeführt und nutzt die Verschiebung des so genannten „Azimut-Spektrums“. Da dieses mit der Antennenfunktion gewichtet ist, lässt sich eine Verschiebung bei genügender Mittelung gut messen. In diesem Fall wurden 200 Spektren mit 256 Abtastwerten gemittelt. Diese so genannte „Doppler Centroid“ Analyse wurde mit einem gleitenden Analysefenster ausgeführt. Um den Referenzwert für die Geschwindigkeit Null zu erhalten, wurden auch Messungen außerhalb

des Gletscherlaufs auf unbewegten Boden durchgeführt.

Da das Analysefenster im Randbereich des Gletscherlaufs auch Pixel aus dem umliegenden sich nicht bewegenden Land mit einbezieht, kommt es im Randbereich des Gletscherlaufs zu einer systematischen Unterschätzung der Fließgeschwindigkeit. Da das Analysefenster eine Größe von nur 0,12 km² besitzt, der Gletscherlauf aber eine Fläche von 11,35 km² abdeckt, ist dieser Fehler nicht signifikant. Tatsächlich zeigte eine Überprüfung

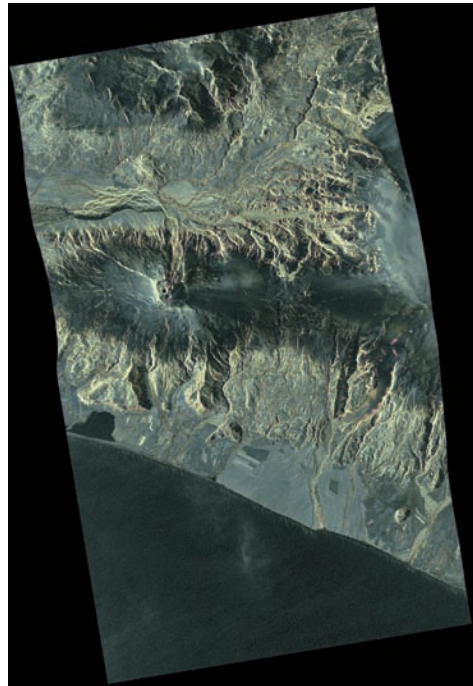


Abb. 9: TSX-Szene vom 15.4.2010 Stripmap T26 str019R; © DLR.

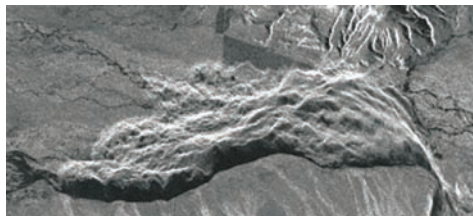


Abb. 10: Ausschnitt des Gletscherlaufs aus obiger TSX Stripmap Szene, Fläche von 11,35 km², max. Länge 6,9 km u. Breite 1,8 km.

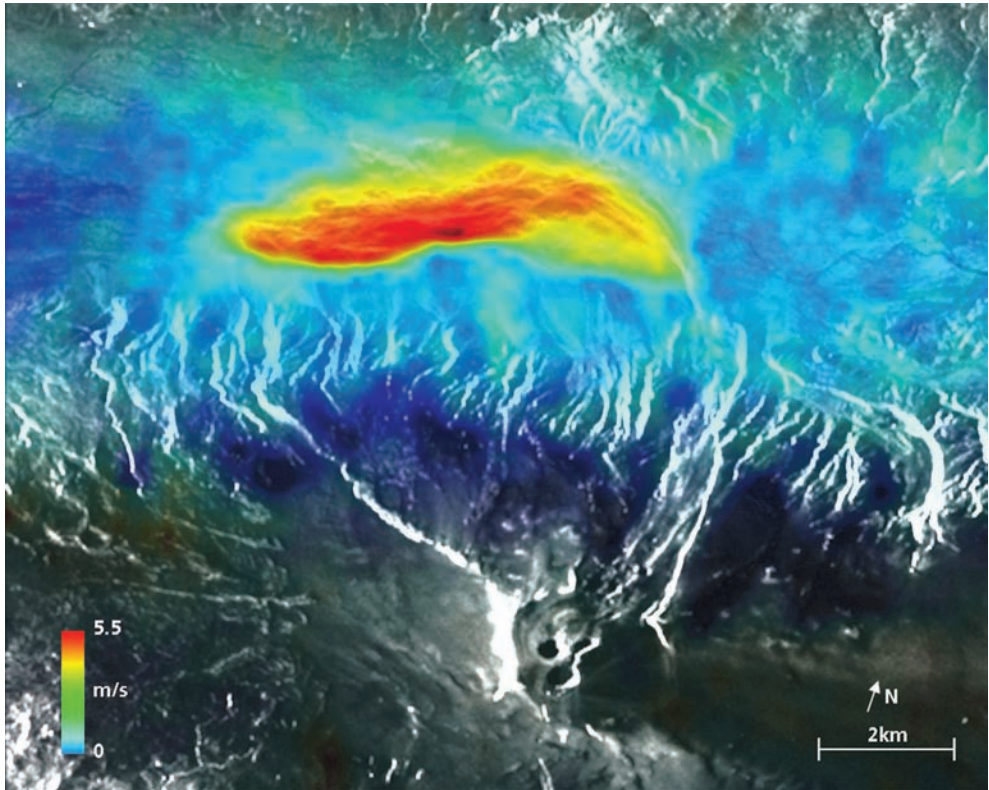


Abb. 11: TSX-Szene vom 15.4.2010 mit überlagerter Dopplerfrequenz-Messung; Stripmap T26 str019R (nicht geocodiert). © DLR

des ermittelten Mittelwerts für die Dopplerverschiebung mit Hilfe eines kalibrierten Standard-Messprogramms zur Doppler Centroid Schätzung von SAR Daten eine sehr gute Übereinstimmung.

Mit der Distanz von 7,0 km von der Front des Gletscherlaufs ($63,684^\circ$ Nord und $19,780^\circ$ West) bis zum Ausfluss aus dem Gletschersee und der ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeit lässt sich aus der TS-X Aufnahme der Zeitpunkt rekonstruieren, wann die Schmelzwasserflutwelle im Gletschersee im Tal angekommen sein müsste. Dieser Moment lag rund 25 Minuten vor der TS-X Aufnahme, also um 18:45h.

Für den weiter flussabwärts liegenden zweiten Teil des Gletscherlaufs lässt sich die Fließgeschwindigkeit aus Daten der hydrologischen Messstation des Meteorologischen Instituts Reykjavík (www.vedur.is) und der TS-X Auf-

nahme ermitteln. Die Pegel-Messstation liegt an der alten Brücke über den Fluss Markarfljót auf $63,655^\circ$ Nord und $19,950^\circ$ West. Der sprunghafte Anstieg des Pegels durch den Gletscherlauf wurde dort um 19:56h registriert. Die Distanz von der Messstation bis zur Stirnfront des Gletscherlaufs in der TS-X Aufnahme (aufgenommen um 19:05h) beträgt ca. 10,0 km, für die der Gletscherlauf 51 Minuten benötigte. Die für diesen Streckenabschnitt ermittelbare Fließgeschwindigkeit liegt also bei 3,3 m/s. Da in diesem Bereich das Gefälle mit 5,4 m auf 1 km deutlich geringer ist, als im oberen Abschnitt (10 m auf 1 km) ist die niedrigere Fließgeschwindigkeit plausibel.

Die hier erstmals über Land ausgeführten Doppler-Messungen von Wassermassen mit Hilfe von SAR-Bildern könnten in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Erfassung von Flutereignissen beitragen.

5 Ausblick: SAR-Überwachung des subglazialen Vulkans Katla (Mýrdalsjökull)

Die Möglichkeit eines weiteren Ausbruchs des Nachbarvulkans Katla erfordert es rechtzeitig ein SAR-Monitoring aufzubauen. Mit seinen 596 km² Fläche ist der Mýrdalsjökull mit dem subglazialen Zentralvulkan Katla der viertgrößte Plateau-Gletscher Islands. Die Eismächtigkeit wurde mit Hilfe des radio echosounding Verfahrens bestimmt (BJÖRNSSON et al. 2000). Die mächtigste Eisaufgabe befindet sich im nordöstlichen Teil der Katla-Caldera, wo ein Bereich von 12 km² mehr als 600 m Eisdicke aufweist. Nach BJÖRNSSON et al. (2000) beträgt das gesamte Eisvolumen am Mýrdalsjökull 140 km³, ca. 45 km³ liegen derzeit innerhalb der Katla-Caldera. Aufgrund der Eruptionszyklen der Katla (längste Ruhephase 80 Jahre, kürzeste 13 Jahre) sowie seismischer Aktivität in den letzten Jahren könnte ein erneuter Ausbruch jederzeit erfolgen (MÜNZER et al. 2004, SCHARRER et al. 2007). Die bislang aufgetretenen subglazialen Vulkanausbrüche hatten, zuletzt im Jahr 1918, katastrophale Auswirkungen zur Folge (LARSEN 2000, STURKELL 2010). So betrug 1918 der max. Schmelzwasserabfluss des Gletscherlaufs im Mýrdalssandur ca. 300.000 m³/s (BJÖRNSSON 1992, SIGURDSSON et al. 2000).

Aufbauend auf die langjährige ENVISAT-ASAR Überwachung des Mýrdalsjökulls mit InSAR und Change Detection Verfahren wird derzeit die Eismorphologie mit TerraSAR-X (ScanSAR, Stripmap) auf Veränderungen untersucht (Abb. 12).

Die Eisdepressionen und glazialmorphologischen Veränderung eignen sich in idealer Weise als Indikatoren zum Aufbau eines satellitengestützten Frühwarnsystems für subglaziale Vulkane (MÜNZER et al. 2005, JAENNICHKE et al. 2006, SCHARRER et al. 2007). So pauste sich beim Vulkanausbruch der Gjalp (1996) einen Tag zuvor die Vulkanspalte mit ihrem Einzugsbereich durch das einige hundert Meter dicke Gletschereis am Vatnajökull. Festgestellt wurde dies auf einer JERS-1/SAR Szene vom 1.10.1996 (MÜNZER et al. 2001, 2007). Eine Frühwarnung konnte damals wegen einer zu langen Datenlieferung nicht

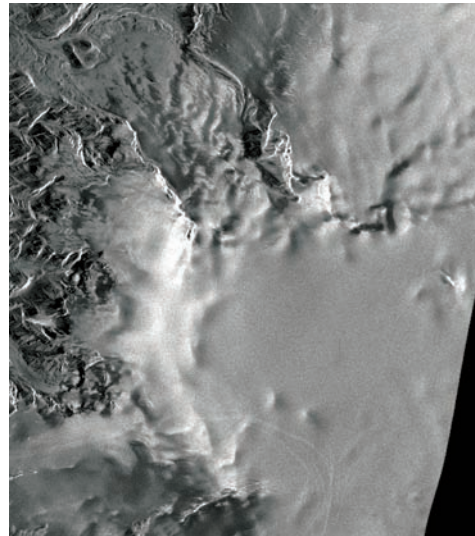


Abb. 12: TSX-Stripmap (31.3.10, © DLR) u. Luftbild (29.8.03, U. MÜNZER) mit Eisdepressionen und Schmelzwassertunnel am Mýrdalsjökull.

rechtzeitig gegeben werden. Mit der schnellen Datenverfügbarkeit beim TerraSAR-X besteht nun eine deutlich verbesserte Chance für eine Frühwarnung.

Am 21.6.2010 wurde der Schwester-Satellit TanDEM-X erfolgreich im Orbit positioniert. Ab 2011 soll mit dem Satellitenpaar ein globales Oberflächenmodell der Erde, mit bisher unerreichter Genauigkeit (Flächenraster von 10 m, Max. Höhenfehler 1 m) aufgenommen werden (BAMLER et al. 2008). Durch einen engen Formationsflug wird die bistatische interferometrische Vermessung der Erdoberfläche möglich. Neben dieser flächendeckenden Aufgabe ergibt sich durch die Verfügbarkeit von

zwei Satelliten eine deutliche Verbesserung der Identifikation und Untersuchung von kurzfristigen Oberflächenveränderungen.

6 Schlussfolgerung

Die laufenden Untersuchungen haben gezeigt, dass mit den TerraSAR-X Radardaten ein NRT-Monitoring bei Naturkatastrophen möglich ist und nahezu lückenlose Zeitserien für eine kontinuierliche Überwachung erstellt werden können. Durch eine kurzfristige Programmierung des TerraSAR-X durch das DLR wurde der Vulkan Eyjafjallajökull bereits am 15.4.2010, d. h. einen Tag nach dem Ausbruch, aufgenommen. Die Datenauslieferung erfolgte bereits wenige Stunden später.

Die hochauflösenden Stripmap-Produkte (EEC Enhanced Ellipsoid Corrected) erfüllen alle Voraussetzungen um erste Analysen und Prognosen zum Vulkanausbruch geben zu können. Die fortführenden Untersuchungen werden sich jedoch auf SSC-Produkte (Single Look Slant Range Complex) stützen, die mit genaueren DHM's (20 m Raster) und Corner-Reflektoren als Passpunkte prozessiert werden.

Erstmals konnte mit Hilfe der Doppler-Frequenz-Messung die Fließgeschwindigkeit von Schmelzwasser bei einem Gletscherlauf durch die hohe geometrische Auflösung der TerraSAR-X Daten erfasst werden. Die Kombination der schnellen Detektierung von Oberflächenveränderungen ungeachtet der Wolkenbedeckung und der Analyse von dynamischen Prozessen birgt ein erhebliches Potential für die zukünftige Überwachung von Naturgefahren.

Danksagung

Dem TSX-Science Coordinator, Achim Roth und Ursula Marschalk sowie dem Team des Order Helpdesk am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des DLR, Oberpfaffenhofen sei ein herzlicher Dank für ihren außergewöhnlichen Einsatz zum Vulkan-Monitoring und Hilfe ausgesprochen.

Wertvoll zu unseren SAR-Interpretationen waren die Luft- und Geländefotos über die

beiden Eruptionsstellen, die uns Ragnar Axelsson (RAX), Reykjavík, zur Verfügung gestellt hat. Hans H. Hansen, Fixlanda ehf., Kópavogur, unterstützte uns mit entsprechenden Kartenausschnitten. Ihnen sei ein herzlicher Dank ausgesprochen.

Den drei anonymen Reviewern sei für die kritischen Anmerkungen herzlich gedankt.

Literatur

- ADALGEIRSDÓTTIR, G., 2003: Flow dynamics of Vatnajökull ice cap, Iceland. – PhD Thesis, 178 pp., ETH Zürich.
- BAMLER, R., ADAM, N., HINZ, S. & EINEDER, M., 2008: SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 7/2008: 243–252.
- BJÖRNSSON, H., 1988: Hydrology of Ice Caps in Volcanic Regions, Reykjavík.
- BJÖRNSSON, H., 1992: Jökulhlaups in Iceland: Prediction, Characteristics and Simulation. – Annals of Glaciology 16: 95–106.
- BJÖRNSSON, H., PÁLSSON, F. & GUDMUNDSSON, M.T., 2000: Surface and bedrock topography of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland: The Katla caldera, eruption sites and routs of jökulhlaups. – Jökull 49: 59–74.
- CHAPRON, B., 2005: Direct Measurement of Ocean Surface Velocity from Space: Interpretation and Validation. – Journal of Geophysical Research 110: C07008.
- DLR-Missionsbroschüre, 2009: TerraSAR-X – Das deutsche Radarauge im All. – Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e.V., Bonn, 44 S.
- EINARSSON, P., BJÖRNSSON, S., FOULGER, G., STEFÁNSSON, R. & SKAFTADÓTTIR, TH., 1981: Seismicity pattern in the South Iceland seismic zone, From Earthquake Prediction – An International Review. – Maurice Ewing Series 4: 141–151.
- EISBACHER, G.H., 1991: Einführung in die Tektonik. – VIII, 310 S., Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- GUDMUNDSSON, M.T., SIGMUNDSSON, F. & BJÖRNSSON, H., 1997: Ice-volcano interaction of the 1996 Gjalp subglacial eruption, Vatnajökull, Iceland. – Nature 389: 954–957.
- GUDMUNDSSON, M.T., SIGMUNDSSON, F., BJÖRNSSON, H. & HÖGNADÓTTIR, T., 2003: The 1996 eruption at Gjalp, Vatnajökull ice cap, Iceland: efficiency of heat transfer, ice deformation and subglacial water pressure. – Research Article; Bull. Volc. 66: 46–65.
- GUDMUNDSSON, M.T. & HÖGNADÓTTIR, TH., 2005: The melting distribution and origin of the jökul-

- hlaups that can be caused by eruptions from western Mýrdalsjökull and Eyjafjallajökull. – Assessment of hazard due to eruptions and jökulhlaups from western Mýrdalsjökull and Eyjafjallajökull, Reykjavík, Iceland, University Publ., 158–179.
- HJALTADÓTTIR, S., GEIRSSON, H. & SKAFTADÓTTIR, TH., 2005: Seismic activity in Iceland during 2004. – *Jökull* **55**: 107–119.
- ICELANDIC METEOROLOGICAL OFFICE: www.vedur.is.
- JAKOBSSON, S.P., 1979: Outline of the Petrology of Iceland. – *Jökull* **29**: 57–73.
- JAENICKE, J., MAYER, C., SCHARRER, K., MÜNZER, U. & GUDMUNDSSON, Á., 2006: The use of remote-sensing data for mass-balance studies at Mýrdalsjökull ice cap, Iceland. – *Journal of Glaciology* **52** (179): 565–573.
- LARSEN, G., 2000: Holocene eruption within the Katla volcanic system, south Iceland. – *Jökull* **49**: 1–28.
- MAGNÚSSON, E., BJÖRNSSON, H., DALL, J. & PÁLSSON, F., 2005: Volume changes of Vatnajökull ice cap, Iceland, due to surface mass balance, ice flow, and subglacial melting of geothermal areas. – *Geophysical Research Letters* **32**: LO55504, doi: 10.1029/2004GL0211111615.
- MAYER, C., LAMBRECHT, A., BELÓ, M., SMIRAGLIA, C. & DIOLAIUTI, G., 2006: Glaciological characteristics of the ablation zone of Baltoro Glacier, Karakoram, Pakistan. – *Annals of Glaciology* **43**: 123–131.
- MIHALCEA, C., MAYER, C., DIOLAIUTI, G., D'AGATA, C., SMIRAGLIA, C., LAMBRECHT, A., VUILLERMOZ, E. & TARTARI, G., 2008: Spatial distribution of debris thickness and melting from remote sensing and meteorological data at debris-covered Baltoro glacier, Karakoram, Pakistan. – *Annals of Glaciology* **48**: 49–57.
- MÜNZER, U., BAHR, T. & WEBER-DIEFENBACH, K., 2000: Katastrophen-Monitoring am Beispiel Islands. – *Schlußbericht: Förderkennzeichen 50 EE 9706*, München, 62 S.
- MÜNZER, U., GUDMUNDSSON, Á., & WEBER-DIEFENBACH, K., 2001: Überwachung subglazialer Vulkane auf Island mit geowissenschaftlichen und fernerkundlichen Methoden. – *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* **9**: 326–339.
- MÜNZER, U. & WEBER-DIEFENBACH, K., 2003: Remote Sensing of Subglacial Eruptions in Iceland and Development of Related Warning Systems. – *International Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters*, Springer, 515–520.
- MÜNZER, U., SCHARRER, K., WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á., 2004: Integration of ENVISAT-ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]. – *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* **13**: 417–429.
- MÜNZER, U., SCHARRER, K., WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á., 2005: Integration of ENVISAT-ASAR Data in a Hazard-Monitoring-GIS. – *ENVISAT-Project [ID 142]*. ENVISAT and ERS Symposium, ESA **SP-572**, Noordwijk, The Netherlands.
- MÜNZER, U., GUDMUNDSSON, Á. & MARTINIS, S., 2007: NRT monitoring of the 2004 subglacial Grímsvötn eruption (Iceland) with ENVISAT-ASAR data. – *ENVISAT Symposium, ESA SP-636*, Noordwijk, The Netherlands.
- PÁLMASSON, G., 1986: Model of Crustal Formation in Iceland and Application to Submarine Mid-Ocean-Ridge – The Western North Atlantic Region. – *Geological Society of America Vol. M: Geology of North America*, 87–97.
- ROSSI, C., 2010: Surface Current Retrieval from TERRASAR-X Data Using Doppler Measurements. – *IGARSS, IEEE*, in press.
- SAEMUNDSSON, K., 1979: Outline of the Geology of Iceland. – *Jökull* **29**: 7–28.
- SCHARRER, K., SPIELER, O., MAYER, C. & MÜNZER, U., 2007: Imprints of subglacial volcanic activity on the glacier surface – SAR study at the Katla volcano (Iceland). – *Bulletin of Volcanology* DOI 10.1177/s00445-007-0164-z, 495–506.
- SIGURDSSON, O., 1992: Jöklabreytingar 1930–1960, 1960–1990 og 1990–1991. – *Jökull* **42**: 81–88.
- SIGURDSSON, O., 1998: Glacier variation in Iceland 1930–1995. – *Jökull* **45**: 3–25.
- SIGURDSSON, O., ZÓPHONIASSON, S. & ISLEIFSSON, E., 2000: The Jökulhlaup from Sólheimajökull, July 18th 1999. – *Jökull* **49**: 60–75.
- SIGURDSSON, O., 2005: Jöklabreytingar 1930–1960, 1960–1990 og 2003–2004. – *Jökull* **55**: 163–170.
- STURKELL, E., EINARSSON, P., SIGMUNDSSON, F., HOOPER, A., ÓFEIGSSON, B.G., GEIRSSON H. & ÓLAFSSON, H., 2010: Katla and Eyjafjallajökull Volcanoes. – *Developments in Quaternary Sciences* **13**: 5–21.

Adressen der Autoren:

Dr. rer. nat. ULRICH MÜNZER, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie (Geologische Fernerkundung), Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstr. 37, 80333 München, Tel.: +49-89-2180-6589, e-mail: ulrich.muenzer@iaag.geo.uni-muenchen.de.

Dr. rer. nat. CHRISTOPH MAYER, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Glaziologie

gie, Alfons-Goppel-Str. 11, 80539 München, Tel.: +49-89-2331-1260, e-mail: christoph.mayer@lrz.badw-muenchen.de.

Dipl.-Geol. LUTZ REICHEL, 3D Remote Sensing Geoconsult, Alpenrosenstr. 3, 82216 Maisach, Tel.: +49-8141-404414, e-mail: 3dremotesensing@googlemail.com.

Dipl.-Ing. HARTMUT RUNGE, Dr. rer. nat. THOMAS FRITZ, MSc. CRISTIAN ROSSI, Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e.V., Institut für Methodik der

Fernerkundung, Münchner Str. 20, 82234 Weßling, Tel: +49-8153-28-1364, e-mail: hartmut.runge@dlr.de, thomas.fritz@dlr.de, cristian.rossi@dlr.de.

ÁGÚST GUDMUNDSSON, Fjarkönnun ehf., Furugrund 46, 200 Kópavogur, Island, Tel.: +354-8691849, e-mail: fjarkonn@simnet.is.

Manuskript eingereicht: Mai 2010
Angenommen: Juni 2010