

## Fernerkundung aktiver Vulkane mit Kleinsatelliten

Prof. Dr. Dieter Oertel (Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH)

**Eine Demonstrator-Mission anlässlich des Stromboli-Ausbruchs von 2014 zeigt, dass Kleinsatelliten neue Möglichkeiten für das Vulkanmonitoring bieten.**

- Vulkanausbrüche lassen sich auch aus dem Orbit beobachten. Das ist insbesondere hilfreich, wenn keine Bodenstationen vorhanden sind.
- Für die Ermittlung der Lavaaustritts-Rate ist eine gute Bodenauflösung nützlich. Kleinsatelliten bieten hier neue Möglichkeiten für das Monitoring.
- Eine Symbiose der Daten zukünftiger „feuer- und lavatauglicher“ Infrarot-Sensoren auf geostationären meteorologischen Satelliten und auf Kleinsatelliten, die in einem niedrigen Erdumlauf fliegen, kann zu einer neuen Qualität im Monitoring von Vulkanen führen.

Vulkanausbrüche sind natürliche Hoch-Temperatur-Ereignisse (HTE) mit zum Teil dramatischen Auswirkungen auf Umwelt, Gesundheit, Landwirtschaft und Luftverkehr. Deshalb ist es interessant zu wissen, welche Information bzw. welche physikalischen Messwerte über diese Vulkanausbrüche und die damit verbundenen Phänomene aus Satellitendaten gewonnen werden können.

Zu diesen für die Fernerkundung aus dem Orbit interessanten Phänomenen zählen zum Beispiel Gas- und Aschewolken, Lavaströme oder pyroklastische Ströme.

Unter den Fernerkundungssatelliten sind besonders solche für die Beobachtung aktiver Vulkane geeignet, die über Sensoren im Bereich infraroter Wärmestrahlung (IR=Infrarot) verfügen. Konkret sind das Satellitensensoren, die bildhafte Daten in den Wellenlängenbereichen des Mittleren IR (MIR, bei 3–5  $\mu\text{m}$ ) und des Thermalen IR (TIR, bei 8–12  $\mu\text{m}$ ) bei Tag und auch nachts generieren können.

Die Systeme MODIS und SLSTR erreichen in den Spektralbändern des Mittleren InfraRot (MIR) und Thermalen InfraRot (TIR) nur eine maximale räumliche Auflösung von größer als einem Kilo-

meter. Für die zuverlässige Abschätzung etwa der bei einem Vulkanausbruch ausströmenden Lavamasse ist das zu grob.

### Satellitensensoren zur infraroten Beobachtung aktiver Vulkane

Es gibt weltweit derzeit mehrere operationell betriebene, von Pol zu Pol die Erde umkreisende Infrarot-Satellitensensoren, die neben vielen anderen Anwendungen auch zur infraroten Beobachtung aktiver Vulkane im „24/7“-Dauerbetrieb genutzt werden. Drei der wichtigsten Infrarot-Satellitensensoren davon sind:

- das MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) der NASA,
- das Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) von NOAA und NASA und
- das Sea Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) des europäischen Copernicus Programms (Wooster et al., 2012).

Die Daten, die MODIS, VIIRS und SLSTR erzeugen, sind kostenlos verfügbar. Alle drei Systeme werden weltweit als Wächter und Melder insbesondere von Ausbrüchen entlegener Vulkane genutzt. Zum Beispiel befinden sich zahlreiche

sehr aktive Vulkane in den Anden. Dort können sie kaum oder gar nicht von bodengebundenen Sensoren permanent überwacht werden.

Das VIIRS hat in seinem MIR-Band „I 4“ eine bessere räumliche Auflösung von kleiner als 400 Metern, jedoch nur in seinem zentralen Schwadbereich von 1.000 km Breite. In der Fachsprache meint „Schwad“ den Aufnahmestreifen, den ein Sensor über der Erdoberfläche erfasst. Die Breite dieses Streifens ist die Schwadbreite. Allerdings übersteuern die MIR-Daten des VIIRS bei Pixeltemperaturen von über 367 Kelvin bzw. 94° Celsius („Pixelsättigung“). Das bedeutet, dass sie bei stärkeren vulkanischen Aktivitäten nicht für deren physikalisch-energetische Bewertung verwendet werden können, da diese eine Pixeltemperatur von 100° Celsius schnell überschreiten.

### Kleinsatelliten können eine Lücke stopfen

Es gibt also eine „Infrarot-Beobachtungslücke“ im Fernbeobachtungsangebot der „großen“, institutionellen Raumfahrtakteure. In dieser Nische kommen immer stärker Kleinsatelliten zum Einsatz.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH („Astrofein“) und weitere deutsche mittelständige Unternehmen sowie wissenschaftliche Partner haben mit drei Kleinsatelliten-Missionen essentielle Beiträge zur Feuerbeobachtung und quantitativen Bewertung von Hoch-Temperatur-Ereignissen (HTE) geleistet:

- erstens die Demonstrator-Mission Bi-spectral InfraRed Detection (BIRD), die 2001 zur dedizierten Detektion und Bewertung von Feuern gestartet und bis 2004 betrieben wurde (Oertel et al., 2002),
- zweitens den Satelliten Technologie-Erprobungs-Träger N°1 (TET-1), der 2012 gestartet und im Anschluss an seine einjährige Mission zur Erprobung diverser Technologien bzw. Testnutzlasten (On-Orbit-Verification, OOV) für fast sechs Jahre als Feuerbeobachtungssatellit im Rahmen der DLR-



Abb. 1: Beispiel für Bodenspuren des TET-1. Links sind drei Tagspuren und rechts sieben Nachts Spuren gezeigt. Die Abbildung wurde mit Planungswerkzeug SPOT (SwathPreview & OrderingTool) erstellt, welches vom DLR-GSOC (German Space Operation Center) entwickelt wurde (Lorenz et al., 2017, S. 106 f.). Bild: DLR/GSOC

FireBIRD-Mission genutzt wurde, (Lorenz et al., 2017), sowie

- drittens den Feuerbeobachtungssatellit Berlin InfraRed Optical System (BIROS), der 2016 gestartet wurde und zusammen mit TET-1 in der FireBIRD-Mini-Konstellation die Erde umkreist.

Diese drei Kleinsatelliten – BIRD, TET-1 und BIROS – wurden aus Kostengründen „Huckepack“ (engl. „piggy back“) mit anderen Satelliten in polare Bahnen von 500 bis 560 Kilometer Höhe gestartet. Sie umlaufen die Erde in einem Low Earth Orbit (LEO) von Pol zu Pol. Die Erde dreht sich quasi unter ihnen weg, sodass ihre auf eine Erdkarte aufgetragene Bodenspuren sich in einer Art Wellenkurve darstellen. Dies zeigt Abbildung 1 für einen Weltkartenausschnitt.

Im Unterschied zu den operationellen Sensorsystemen MODIS, VIIRS und SLSTR, die zwar eine tägliche globale Überdeckung gewährleisten, dafür aber nur größere vulkanische Aktivitäten erkennen und grob bewerten können, erlauben die FireBIRD-Satelliten die Erfassung und physikalisch-energetische Bewertungen von sehr kleinen bis zu großen vulkanischen Aktivitäten.

Mit TET-1 und BIROS sind Wiederholraten von zwei bis drei Tagen erreichbar, auch für niedere

	MODIS	VIIRS	SLSTR	FireBIRD
Gestartet im Jahr [Satellit]	1999 [Terra] 2002 [Aqua]	2011 [Suomi National Polar-orbiting Partnership]	2015 [Sentinel 3A] 2018 [Sentinel 3B]	2012 [TET-1] 2016 [BIROS] <sup>(1)</sup>
Bahnhöhe	705 km	829 km	815 km	500–560 km
Aufnahme-Schwadbreite	2.330 km	3.060 km	1.407 km	162–178 km
MIR- und TIR-Bodenpixel-Kantenlänge (im Nadirbereich)	1.000 m (+/- 500 km um Nadir)	375 m (+/- 500 km um Nadir)	1.000 m (im gesamtem Schwad)	320–356 m (im gesamtem Schwad)
MIR- und TIR-Pixel-Sättigungstemperatur	MIR: 450 Kelvin TIR: 400 Kelvin	MIR: 367 K , TIR: 300 K (Sättigung im MIR und TIR bei großen HTEs) <sup>(4)</sup>	MIR: 500 Kelvin TIR: 400 Kelvin	MIR: 630 Kelvin TIR: 600 Kelvin
Fläche des kleinsten im Nadir zu detektierenden 1.000 K HTE's <sup>(2)</sup>	~150 m <sup>2</sup>	~20–30 m <sup>2</sup>	~150 m <sup>2</sup>	15 -20 m <sup>2</sup>
Re-visit time <sup>(3)</sup>	12 Stunden	12 Stunden	24 Stunden	12 Stunden – 3 Tage <sup>(5)</sup>

**Tabelle 1. Merkmale und Parameter der zur Beobachtung von Hoch-Temperatur-Ereignissen (HTE) genutzten Infrarot (IR)-Bänder von MODIS, VIIRS, SLSTR und FireBIRD.**

(1) Beides sind Kleinsatelliten. (2) Bei 300 K, d. h. 27 °C Umgebungstemperatur. (3) Re-visit time ist der minimale Zeitabstand, in dem ein Ziel überflogen wird. (4) Das Problem der relativ niedrigen Sättigungstemperatur von 367 K beim VIIRS MIR Band I4 (Auflösung 375 m) wird in den operationellen Produkten der NASA dadurch umgangen, dass für die Ableitung der Energie (FRP oder VRP) Aufnahmen des Bands M13 herangezogen werden. M13 deckt den gleichen Wellenlängenbereich wie I4 ab, verfügt aber über eine bessere Sättigungstemperatur (659 K) bei allerdings gröberer Bodenauflösung (750 m). Bei der NASA führt man die Information beider Bänder zusammen, indem in der entsprechenden Auflösungszelle die Energie aus den gröber aufgelösten M13 Band gleichmäßig auf die im Band I4 detektierten Hotspots verteilt wird. (5) Die Re-visit-Time der Satelliten TET-1 und BIROS ist variabel durch den Blickwinkelschwenk um +/- 30° von Nadir, was auch eine Beobachtung eines Ziels an maximal drei aufeinanderfolgenden Tagen erlaubt.

**Erläuterung:** *MIR*: Mittleres Infrarot, *TIR*: Thermales Infrarot, *Nadir*: ein Punkt auf dem Boden, vertikal unter den Linsen eines Sensorsystems, *Schwad*: Breite des Aufnahmestreifens, gemessen auf der Erdoberfläche in Kilometern senkrecht zur Flugbahn.

Breiten. Hier kann die Blickrichtung ihrer Sensoren  $\pm 30^\circ$  nach rechts und links von Nadir geschwenkt werden. Somit ist ein Einzugsbereich von etwa 800 Kilometer möglich. Ein Vulkan kann an drei Tagen hintereinander beobachtet werden. Die Bodenauflösung Ground Sampling Distance, (GSD) beträgt ca. 350 Meter. Damit sind deutlich detailliertere Beobachtungen möglich als mit MODIS oder SLSTR.

### Die Beobachtung des Stromboli-Ausbruchs von 2014 mit TET-1

Stromboli ist eine Insel vulkanischen Ursprungs im Mittelmeer nördlich von Sizilien. Diese Insel besteht im Wesentlichen aus dem Stromboli-Vulkan, der durch seine regelmäßigen und häufigen Ausbrüche auch den Spitznamen „Leuchtturm des Mittelmeeres“ trägt.

Während eines größeren Ausbruchs zwischen August und November 2014 wurde der Stromboli von deutschen Vulkanologen vor Ort mit mehreren Infrarot-Kameras und aus dem Weltraum mit MODIS und dem deutschen Kleinsatelliten TET-1 beobachtet, was wissenschaftlich dokumentiert ist und die Grundlage für diesen Beitrag darstellt (Zaksek, Hort & Lorenz, 2015).

Es geht dabei um eine relativ zuverlässige Bestimmung der austretenden Lavamenge durch Monitoring des Stromboli-Ausbruchs mit dem FireBIRD Satelliten TET-1 im Rhythmus von ein bis drei Tagen über mehrere Monate im Jahr 2014.

Die austretende Lavamenge wird bei diesem Ansatz dadurch bestimmt, dass aus wiederholten infraroten Messungen von TET-1 über dem Lavafluss, die durchschnittliche zeitliche Lavaaustritts-Rate – die Time Averaged Lava Discharge Rate (TADR) – annäherungsweise ermittelt wird. TADR gibt einen Mittelwert dafür an, wie viel Kubikmeter Lava pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) aus dem Vulkan zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme austreten.

Mithilfe der TADR-Werte kann die ausfließende Lavamenge zwischen zwei Messzeitpunkten (sog. „Stützpunkten“) berechnet werden. An-

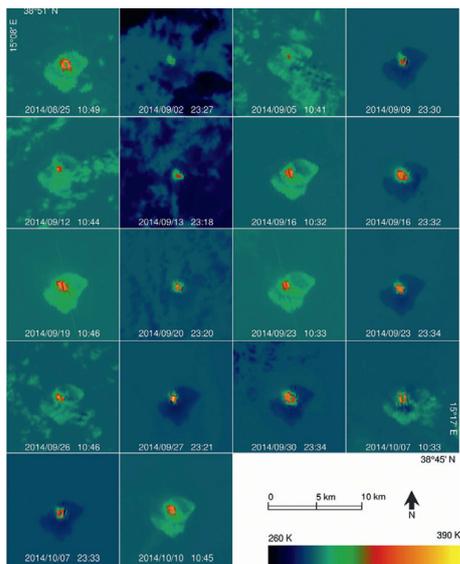


Abb. 2 zeigt eine Google-Earth-Ansicht des Stromboli, in der zusätzlich Krater, Lavaausflussort (rote Pin-Nadel), Lavaflüsse und vier terrestrische Beobachtungspunkte A, B, C und D vom 24. September 2014 (als gelbe Pin-Nadeln) dargestellt sind. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

ders gesagt, es wird zum Zeitpunkt X, für den ein TADR Wert von z. B.  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  ermittelt wurde, dieser mit dem zeitlichen Abstand zwischen Zeitpunkt X und dem nachfolgenden Zeitpunkt Y multipliziert. Angenommen dieser zeitliche Abstand ist 24 Stunden bzw. 86.400 Sekunden, dann beträgt die in diesem Tages-Zeitfenster ausgetretene Lavamenge  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  mal  $86400 \text{ s} = 17.280 \text{ m}^3$ . Das entspricht einem Fußballfeld, das 2,4 Meter hoch mit Lava gefüllt ist. Nach 60 Tagen mit gleichbleibender Lavaaustritts-Rate wäre dies ein 144 Meter hoher Lavaquader mit der Grundfläche eines Fußballfeldes.

### Faktenbasiertes Schätzen

Die zeitlich gemittelte Lavaaustritts-Rate wird aus wolkenfreien TET-1 Aufnahmen, Annahmen zur Umgebungstemperatur und zur Lava geschätzt. Die in die Schätzung eingehenden Annahmen zu Lava betreffen eine ganze Reihe von verschiedenen Werten. Das sind vor allem die Dichte und wärmephysikalischen Eigenschaften der Stromboli-Lava und die Lava-Temperaturen im Kern und an der Basis des Lavastroms. Die aus den TET-1 Daten abgeleiteten Parametern der heißen Lava sind die effektive Temperatur (T), die effektive Fläche (A) sowie die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung, d. h. der Volcanic Radiant Power (VRP). „A“ ist also die wirkliche

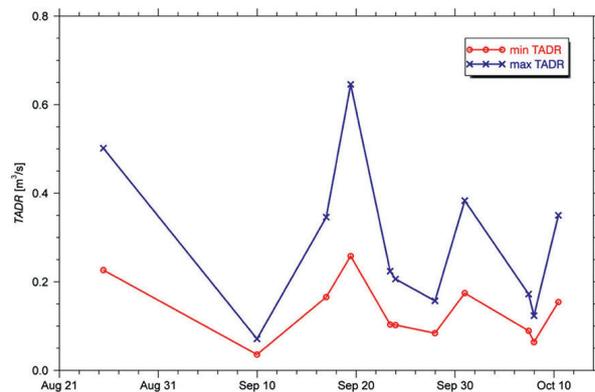


**Abb. 3:** Mosaik von 18 der TET-1 MIR-Band Bildfragmente des Stromboli-Ausbruchs mit Farbkodierung der Pixeltemperatur und Datumsangabe. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

heiße Fläche in einer Pixelfläche am Boden, denn in der Regel wird nicht das ganze Pixel mit einem heißen Medium ausgefüllt sein. Die effektive Fläche „A“, die ein Hoch-Temperatur-Ereignis (HTE) in einem Pixel belegt, ist für einen IR-Sensor mit einer Bodenauflösung von 300 m oder größer in der Regel viel kleiner als die gesamte Pixelfläche. Analog gilt, dass die effektive Temperatur „T“ am Boden somit wesentlich höher sein kann als die Pixelsättigungstemperatur. Bei Messungen über einen längeren Zeitraum kann die Umgebungstemperatur ebenfalls mithilfe der Thermaldaten der Satelliten bestimmt werden.

Vergleichbare Parameter werden auch bei der Fernerkundung von Waldbränden mit Infrarot-Satelliten gewonnen. Hier wird die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung als Fire Radiative Power (FRP) bezeichnet (Oertel, Terzibaschian & Halle, 2019).

Insgesamt hat TET-1 den Stromboli-Ausbruch zwischen dem 25. August und dem 10. Oktober 2014 siebenundzwanzigmal aufgenommen. Allerdings fanden 17 Aufnahmen bei Wolkenbedeckung und nur 10 Aufnahmen ganz ohne Wolken



**Abb. 4:** Kurven der minimalen (rot) und maximalen (blau) Schätzwerte für die zeitlich gemittelten Lavaaustrittsraten. Anmerkung: In diesem Bild ist die Zeitskala auf der Ordinate gegenüber den entsprechenden Datumsangaben in Bild 2 und in Tabelle 2 um einen Tag nach rechts verschoben. Abbildung aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

statt. Abbildung 3 stellt ein Mosaik von 18 Bildfragmenten der Satellitenaufnahmen im MIR-Band dar, die in diesem Zeitraum registriert wurden. Die Farbkodierung zeigt dabei die Pixeltemperatur an. Tabelle 2 enthält für zehn wolkenfreie TET-1-Aufnahmedaten die effektive Temperatur und die effektive Fläche sowie die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung der heißen Lava (VRP). Aufnahmen, auf denen Bewölkung zu erkennen ist, verfälschen die Ermittlung dieser Parameter der heißen Lava und werden deshalb zur Ermittlung der Lavaaustrittsraten und in Tabelle 2 nicht berücksichtigt.

Abbildung 4 zeigt zwei Kurven für die durchschnittlichen zeitlichen Lavaaustrittsraten (TADR), welche aus den in Tabelle 2 und Tabelle 3 für zehn zeitliche Stützpunkte angeführten Parametern ermittelt wurden. Der minimale oder der maximale Schätzwert ergeben sich daher, dass die in Tabelle 3 in den Spalten „Min TADR“ oder „Max TADR“ angegebenen maximalen oder minimalen angenommenen Werte zu den Eigenschaften der Lava verwendet werden und sich so am Ende daher eine maximale und eine minimale TADR-Kurve ergibt. Die maximale Lavaaustrittsraten gibt an, wie viel Kubikmeter heiße Lava pro Se-

Date/Time	T (K)	A (Ha)	VRP <sub>DB</sub> (MV)	VRP <sub>W</sub> (MW)
2014/08/25 10:49	572	3.2	182	187
2014/09/09 23:30	672	0.2	23	36
2014/09/16 23:32	587	1.7	105	155
2014/09/19 10:46	504	7.4	238	167
2014/09/23 10:33	583	1.3	78	90
2014/09/23 23:34	601	0.7	52	102
2014/09/27 23:21	966	0.1	62	94
2014/09/30 23:34	541	2.6	115	150
2014/10/07 10:33	724	0.3	49	95
2014/10/07 23:33	698	0.2	32	68
2014/10/10 10:45	539	2.7	117	124

**Tabelle 2:** Zehn zeitliche Stützpunkte aus wolkenfreien TET-1 Aufnahmedaten mit abgeleiteten Parametern für: Effektive Temperatur (T), effektive Fläche (A) und die nach oben aufsteigenden Strahlungsleistungen der heißen Lava (VRP). Tabelle aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

kunde höchstens ausgetreten sein können, die minimale folglich, wie viel Kubikmeter Lava pro Sekunde mindestens ausgetreten sind. Die Menge der austretenden Lava in Kubikmeter wird berechnet aus den TADR Stützwerten (in Kubikmeter pro Sekunde) multipliziert mit der Zeit (in Sekunden) zwischen zwei benachbarten Stützwerten.

Die gute räumliche Auflösung, die sehr hohe radiometrische Dynamik der MIR und TIR-Bänder und die Möglichkeit, den Blickwinkel des Sensors von TET-1 um +/- 30° von Nadir zu schwenken (Schwad), erlaubten es, bei dem großen Stromboli-Ausbruch im Jahr 2014 über einen Zeitraum von drei Monaten erstmals aus dem Weltraum das Volumen der austretenden Lava mit 7,4 Millionen Kubikmeter abzuschätzen (Zaksek, Hort & Lorenz, 2015). Das entspricht dem Volumen von sieben Lavaquadern, jeder mit der Grundfläche eines Fußballfeldes und 150 Metern Höhe.

## Vision

Die Bestimmung der ausströmenden Lavamenge beim Stromboli-Ausbruch im Jahr 2014 aus den Daten des Satelliten TET-1 war eine überzeugende

Demonstration, was mit „feuer- und lavatauglichen“ IR-Satellitensensoren vom FireBIRD-Typ beim quantitativen Monitoring von Lavaströmen prinzipiell möglich ist.

Bald kommen neue geostationäre meteorologische Satellitensensorsysteme zum Einsatz, die „feuer- und lavataugliche“ MIR-Bänder mit einer stark verbesserten Bodenauflösung von einem Kilometer im Bereich niedriger Breiten (< 30° Nord oder Süd) haben werden. Dazu zählt der Flexible Combined Imager (FCI) auf dem Satelliten Meteosat Third Generation-Imager (MTG-I), der voraussichtlich 2022 gestartet wird. Die FCI-Daten werden mit einer Wiederholperiode von zehn Minuten aufgenommen und zur EUMETSAT-Bodenstation in Darmstadt gesendet.

Damit werden ab dem Jahr 2022 über Afrika und Südeuropa ungesättigte MIR- und TIR-Daten von Feuern und aktiven Vulkanen im 10-Minuten-Takt mit Bodenauflösungen bereitgestellt, welche bisher nur von den polar-orbitierenden, also von Pol zu Pol umlaufenden, operationellen Sensorsystemen MODIS, VIIRS und SLSTR ein oder zwei Mal am Tag geliefert werden. FCI wird so zu einem „sehr aufmerksamen Wächter und

Parameter	Min TADR	Max TADR
$T_{amb}$ ambient air temperature		303 K
$T_{core}$ lava core temperature		1273 K
$T_{base}$ flow base temperature		773 K
$k$ lava thermal conductivity	0 W/m <sup>2</sup> /K	1.5 W/m <sup>2</sup> /K
$h_c$ convective heat transfer coefficients	10 W/m <sup>2</sup> /K	15 W/m <sup>2</sup> /K
$\rho$ lava density	2340 kg/m <sup>3</sup>	2030 kg/m <sup>3</sup>
$c_p$ lava specific heat capacity	1035 J/kg/K	900 J/kg/K
$\Delta T$ temperature diff. between eruption and solidus temperature	350 K	200 K
$f$ mass fraction of post eruption crystallization		0.45
$L$ latent crystallization heat		$3.5 \times 10^5$ J/m <sup>3</sup>
$h$ thickness of thermal boundary layer		1 m

**Tabelle 3:** A-priori-Annahmen zur Abschätzung der minimalen und maximalen Werte für die durchschnittlichen zeitlichen Lavaaustritts-Raten (TADR). Tabelle aus Zaksek, Hort & Lorenz, 2015, MDPI / CC BY 4.0.

Melder“ von Bränden und Vulkanausbrüchen über Europa und Afrika. Die mit dem FCI gewonnenen Daten könnten genutzt werden, um die Blickrichtung von BIROS und/oder zukünftiger in einem niedrigen Erdumlauf fliegender „feuer- und lavatauglicher“ Kleinsatelliten mit einer Bodenauflösung von ca. 300 Meter auf ausgewählte Feuer oder aktive Vulkane zu richten.

Möglich wäre es damit also, punktuell die Bodenauflösung des FCI in seinen „feuer- und lavatauglichen“ MIR- und TIR-Bändern zu „schärfen“, indem man im Bedarfsfalle den BIROS-Satelliten oder vergleichbare Systeme bei ihrer Datenaufnahme so ausrichtet, dass Gebiete von besonderem Interesse räumlich detaillierter erfasst werden.

Die aus diesen mit z. B. 300 Meter Bodenauflösung abgeleiteten Werte für die nach oben aufsteigende Strahlungsleistung eines Feuers oder eines Vulkanausbruchs (FRP oder VRP) können verwendet werden, um für dieses Feuer oder diesen Vulkanausbruch die jeweils zeitlich dazu passenden, aus den FCI-Daten abgeleiteten FRP- oder VRP-Werte wesentlich präziser zu bestimmen. Eine solche Prozedur wird in der Erdbeobachtung als „aufwärts-skalieren“ (engl. up-scaling) bezeichnet.

Für Stromboli- oder Ätna-Ausbrüche nach 2022 könnte man die z. B. einmal täglich mit BIROS und/oder einem vergleichbaren Kleinsatelliten mit feuer- und lavatauglichem IR-Sensor gewonnenen VRP-Werte durch VRP-Werte ergänzen, die im 10-Minuten-Takt aus den räumlich größeren FCI-Daten abgeleitet werden. Diese FCI-VRP-Werte können mit den präziseren VRP-Werten – abgeleitet z. B. aus BIROS-Messungen – „aufskaliert“ werden. Da die FCI-Daten über dem Vulkan im 10-Minuten-Takt gewonnen werden, sind mögliche kurzzeitige Schwankungen oder „Ausreißer“ in der Lavaaustritts-Rate viel besser zu überwachen als bei Aufnahmen mit einem zeitlichen Abstand von zwei aufeinander folgenden Meßüberflügen von einem Tag oder länger.

Es könnte durch diese Symbiose eine völlig neue Qualität bei der Beobachtung von Hoch-Temperatur-Ereignissen wie Vegetationsfeuern oder Vulkanausbrüchen und ihrer quantitativen Bewertung erreicht werden. Der Weg dorthin wäre die hier skizzierte Synthese der Hoch-Temperatur-Ereignis-Daten von zukünftigen geostationären meteorologischen Satellitensensoren, wie etwa dem MTG/FCI, mit den örtlich und zeitlich dazu passenden räumlich höher aufgelösten Daten von Kleinsatelliten-Konstellationen vom FireBIRD-Typ.

## Referenzen

- Halle, W., Terzibaschian, T. & Lorenz, E. (o.D.). FireBIRD [www.dlr.de]. Aufgerufen am 06.07.2020.
- Lorenz, E., Halle, W., Fischer, C., Mettig, N. & Klein, D. (2017). Recent Results of the Firebird Mission. *The International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial information Sciences (XLII-3/W2)*, 105 -111. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-105-2017
- Oertel, D., Briess, K., Lorenz, E., Skrbek, W. & Zhukov, B. (2002). Fire Remote Sensing by the Small Satellite on Bi-spectral Infrared Detection (BIRD). *Photogrammetrie, Fernerkundung & Geoinformation*, 5, 341-350.
- Oertel, D., Terzibaschian, T. & Halle, W. (2019, 24. Dezember). FireBIRD sieht Waldbrände mit Adleraugen. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 6. doi:10.2312/eskp.007
- Wooster, M. J., Xu, W. & Nightingale, T. (2012). Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*, 120, 236-254. doi:10.1016/j.rse.2011.09.033
- Zaksek, K., Hort, M. & Lorenz, E. (2015). Satellite and Ground Based Thermal Observation of the 2014 Effusive Eruption at Stromboli Volcano. *Remote Sensing*, 7(12), 17190-17211. doi:10.3390/rs71215876

# Impressum

## Herausgeber

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

## Redaktion

PD Dr. Dierk Spreen  
Jana Kandarr  
Oliver Jorzik

## Layout

Pia Klinghammer

**E-Mail:** [redaktion-eskp@gfz-potsdam.de](mailto:redaktion-eskp@gfz-potsdam.de)

Alle Artikel sind auch im Internet abrufbar:

<https://themenspezial.eskp.de/vulkanismus-und-gesellschaft/inhalt-937231/>

**Stand:** September 2020

**Heft-DOI:** [doi.org/10.2312/eskp.2020.2](https://doi.org/10.2312/eskp.2020.2)

**ISBN:** 978-3-9816597-3-3

## Zitervorschlag:

Jorzik, O., Kandarr, J., Klinghammer, P. & Spreen, D. (Hrsg.). (2020). *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination*. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2

## Einzelartikel:

[Autor\*innen]. (2020). [Beitragstitel]. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* ([Seitenzahlen]). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:[DOI-Nr.]

Die Verantwortung für die Inhalte der Einzelbeiträge der vorliegenden Publikation liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Empfehlungen zum Verhalten an aktiven Vulkanen, Vulkaninfos für Reisende usw. sind nach bestem Wissen entwickelt worden. Dennoch können das GFZ sowie andere beteiligte Zentren oder Institutionen nicht verantwortlich gemacht werden und keinerlei Haftung für Schäden übernehmen, die durch die Beachtung dieser Hinweise entstehen. Das Gleiche gilt für die zu dieser Publikation beitragenden Autorinnen und Autoren oder in dieser Publikation zitierte Personen.



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen:  
eskp.de | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)