



Die Erde im Anthropozän: Der Blick aus dem Weltall mit Sentinel-1

Earth in the Anthropocene: The View from Space with Sentinel-1

Wolfgang Wagner, Wien

Kurzfassung

Sentinel-1 ist eine Konstellation von Erdbeobachtungssatelliten, die mittels Radarsensoren die Erdoberfläche unabhängig von Wetter und Sichtverhältnissen kontinuierlich beobachtet. Damit können dynamische Veränderungen der Erdoberfläche mit einer räumlichen Auflösung von 20 m erfasst werden. Globale Auswertungen der Sentinel-1 Daten illustrieren, wie sehr die Menschheit die Landoberfläche bereits nach ihren Bedürfnissen umgestaltet hat. Ebenso dokumentieren sie das Ausmaß klimatischer Extremereignisse wie Dürren und Fluten. In diesem Beitrag gebe ich einen Überblick über die an der TU Wien durchgeführten Forschungsarbeiten zur Nutzung von Sentinel-1 für die Beobachtung der Landoberfläche und klimatischer Extremereignisse wie beispielsweise die im Sommer 2022 aufgetretene Dürre in Europa und die verheerenden Überflutungen in Pakistan.

Schlüsselwörter: Erdbeobachtung, Satelliten, Radar, Landnutzung, Klimawandel, Wasser, Vegetation, Bodenfeuchtigkeit

Abstract

Sentinel-1 is a satellite constellation that uses radar sensors to observe the Earth's surface day and night under all weather conditions. This allows monitoring dynamic changes of the Earth's land surface at a spatial resolution of 20 m. A worldwide Sentinel-1 image mosaic illustrates how strongly humanity has already transformed the continental land surface areas according to its needs. Sentinel-1 also helps documenting the severity of climate extremes such as droughts and flooding. In this article, I review research which has been carried out at TU Wien to use Sentinel-1 data for the monitoring of soil, vegetation and inland water, showing some results for summer 2002 when European was plagued by drought conditions and Pakistan hit by devastating flooding.

Keywords: Earth observation, satellites, radar, land use, climate change, water, vegetation, soil moisture

1. Einleitung

Obwohl das Anthropozän noch nicht offiziell als geologisches Zeitalter anerkannt ist, so hat der im Jahr 2002 vom Nobelpreisträger Paul Crutzen im Wissenschaftsjournal *Nature* [1] eingeführte Begriff bereits breite Popularität erlangt. Er drückt nichts anderes aus, als dass der Mensch zur alles dominierenden Kraft von Veränderungen auf der Erde geworden ist. Als Indikator für den Beginn dieser neuen Ära bietet sich der atmosphärische Kohlendioxidgehalt an [2], der von dem vorindustriellen Wert von ca. 280 ppm auf bereits über 410 ppm angestiegen ist und trotz aller Krisen der letzten Jahren ungebrochen zunimmt [3]. Dieser Anstieg ist nicht nur das Resultat der Verbrennung fossiler Brennstoffe, sondern auch Folge industrieller Prozesse und der intensiven Landnutzung. Der CO₂ Gehalt fasst damit gut zusammen, wie sehr die Menschheit bereits in alle natürlichen Prozesse auf der Erde eingegriffen hat.

Schon Jäger- und Sammlergesellschaften beeinflussten durch die Jagd und das Legen von Feuer die Landschaftsentwicklung, und spä-

testens mit Beginn der Landwirtschaft und der Rodung von Wäldern wird das Antlitz der Erde vom Menschen bewusst gestaltet [4]. Die von der Menschheit verursachten Veränderungen können seit dem Start der ersten Erdbeobachtungssatelliten in den 1960er und 1970er Jahren auf globaler Ebene dokumentiert werden und zeichnen ein Bild des raschen Wachstums urbaner Regionen und der Ausbreitung landwirtschaftlicher Flächen bis in die entlegensten Regionen. Überraschenderweise hat, global gesehen, die Waldfläche in den letzten Jahrzehnten zu- statt abgenommen, wobei die Verluste von Regenwald mit dem Zuwachs von Wald in höheren Breitengraden ausgeglichen wurden [5].

Auch wenn das globale Bevölkerungswachstum sich nun verlangsamt und es gelingen sollte den Ressourcenverbrauch pro Kopf zu reduzieren, so wird sich auch im 21. Jahrhundert die Landoberfläche drastisch verändern. Tatsächlich dürfte der Bedarf nach mehr Land die verfügbaren Flächen bei weitem übersteigen [6]. Neben der weiteren Expansion urbaner und landwirtschaftlicher Flä-



Abb. 1: Aufnahme der Erdoberfläche durch den Radarsatelliten Sentinel-1 (Copyright ESA). Die im Bild gezeigten Radardaten wurden an der TU Wien berechnet [15].

Atmosphäre, der Ozeane und der Landoberfläche bereitstellt. Der erste Copernicus Satellit war der im Jahre 2014 gestartete Sentinel-1A Satellit [14], der seitdem mithilfe eines Radarsensors die Erdoberfläche zu jeder Witterung und auch nachts beobachtet (Abbildung 1). Ein zweiter identer Satellit, Sentinel-1B, wurde 2016 gestartet, musste aber leider aufgrund eines Sensordefekts bereits 2022 wieder außer Dienst genommen werden. Die dadurch entstandene Lücke wird durch den Start von Sentinel-1C im Frühjahr 2023 geschlossen.

chen ist dies u.a. durch den notwendigen Ausbau erneuerbarer Energien bedingt, die pro erzeugter Energieeinheit deutlich mehr Fläche als fossile Energieträger benötigen [7]. Des Weiteren muss dringend Land für den Schutz von Biodiversität, der Sequestrierung von Kohlenstoff und für die Bekämpfung der Folgen des Klimawandels gewidmet werden [6]. All dies vor dem Hintergrund, dass die bisher ungebremste Klimaerwärmung deutliche Spuren hinterlassen wird, sei es ob Wälder durch Feuer oder Borkenkäfer großflächig geschädigt werden [8, 9], Gletscher verschwinden [10] oder Fluten ganze Flusslandschaften neu gestalten [11].

Die sich daraus ergebenden Herausforderungen sind nur dann zu bewältigen, wenn der Zustand der Erdoberfläche anhand von Messdaten umfassend charakterisiert werden kann, um u.a. Szenarien für eine nachhaltige Entwicklung durchspielen zu können. Die Verbesserung der Datenerfassung muss Hand in Hand mit der Entwicklung einer neuen Generation von Erdsystemmodellen gehen, um die Daten bestmöglich nutzen zu können [12]. Aktuell wird die Entwicklung solcher Systeme unter dem Schlagwort „Digitale Zwillinge“ vorangetrieben [13].

Dank bedeutender öffentlicher Investitionen in den Aufbau von Satellitenkonstellationen für die zivile Erdbeobachtung und der Öffnung des Datenzugangs findet gerade eine Revolution in der Nutzung von Satellitendaten statt. In Europa spielt dabei das „Copernicus programme“ eine herausragende Rolle, das mit seiner Flotte von Sentinel Satelliten wertvolle Dienste zur Überwachung der

In diesem Artikel möchte ich einen Überblick über die an der TU Wien stattfindende Forschung zur Verwendung von Sentinel-1 Daten für die Beobachtung der Landoberfläche geben. Dank der globalen Abdeckung und der guten räumlichen und zeitlichen Auflösung eignen sich die Sentinel-1 Daten nicht nur für die Dokumentation des Zustands der Landoberfläche sondern auch für die Erfassung hoch dynamischer Prozesse wie Überflutungen, Vegetationswachstum oder Schwankungen im Wassergehalt des Bodens. Dafür ist eine aufwändige Datenvorverarbeitung notwendig, wie ich sie im folgenden Abschnitt beschreiben möchte.

2. Datenaufbereitung

Die Sentinel-1 Satelliten sind ganz auf den Betrieb eines einzigen Sensors, eines Seitensichtradars mit synthetischer Apertur (auf Englisch „Synthetic Aperture Radar“ oder kurz SAR) hin optimiert. Damit wird eine bestmögliche globale Abdeckung mit einer räumlichen Auflösung der SAR Bilder von ca. 20 m erreicht. Europa wird bevorzugt aufgenommen, weshalb beim Betrieb von zwei Satelliten in Durchschnitt alle 2-3 Tage mit einer SAR Aufnahme zu rechnen ist. Global bewegt sich die Wiederholrate zwischen 6 und 12 Tagen. Die dabei aufgenommenen Datenmengen sind gewaltig. Ein mit dem über Land verwendeten „Interferometric Wide Swath“ Mode aufgenommenes SAR Bild deckt eine Fläche von 250 km × 160 km ab und hat dargestellt als Rückstreuintensitätsbild eine Größe von ca. 1 Gigabyte. Das pro Tag von zwei Satelliten aufgenommene Datenvolumen beträgt

mehr als 1 Terabyte, was bedeutet, dass die über die Laufzeit der Mission erzeugte Datenmenge im mehrstelligen Petabyte-Bereich liegt [16].

Solch große Datenmengen benötigen eine hochleistungsfähige IT Infrastruktur und eine aufwändige Datenaufbereitung, um von der guten räumlichen und zeitlichen Abdeckung profitieren zu können. Da diese Aufgabe die Möglichkeiten einer einzelnen Universität übersteigt hat die TU Wien gemeinsam mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und anderen Partnern das EODC Erdbeobachtungsdatenzentrum (<https://eodc.eu/>) gegründet [17]. Durch diese Kooperation ist es gelungen, Petabyte-große Speichersysteme aufzubauen und mit den Supercomputern des Vienna Scientific Clusters (<https://vsc.ac.at/>) zu verbinden. Mit Hilfe dieser Infrastruktur konnte ein globaler Sentinel-1 Datacube mit einer Rasterweite von 20 m erstellt werden, der räumliche als auch zeitliche Datenabfragen gleichermaßen ermöglicht [16]. Der Zugriff auf die als GeoTIFFs abgespeicherten Sentinel-1 Szenen ist mit Open Source Software und eigens programmierten Application Programming Interfaces (APIs) möglich [18, 19]. Für die kartographische Projektion und die Definition eines globalen Grids wurde die Erde in sieben kontinentale Zonen unterteilt [20]. Die Georeferenzierung erfolgte mit Hilfe des globalen 30 m Copernicus Geländemodells, wobei bisher aufgrund der langen Rechendauer nur geometrische aber nicht radiometrische Effekte berücksichtigt wurden. Das stellt speziell im Gebirge und Hügellandschaften ein Problem dar. Mittels Näherungsverfahren, die sich die hohe Stabilität der Sentinel-1 Orbits zugute machen [21], sollte es möglich sein die Datenvorverarbeitung auf den CEOS Standard für Analysis Ready Data (<https://ceos.org/ard/>) umzustellen. Dies hätte vor allem Vorteile bei der Verwendung der Sentinel-1 Daten in mittleren Höhenlagen [22].

3. Bildmosaike

Basierend auf dem Sentinel-1 Datacube können großflächige Radarbilder durch die Mittelung von Radarmessungen über vorgegebene Zeiträume erzeugt werden. Über Land nimmt Sentinel-1 in zwei Polarisationskombinationen auf, nämlich in VV und VH. Der

erste Buchstabe steht dabei für die Polarisation der ausgesandten elektromagnetischen Welle, d.h. in beiden Fällen eine vertikal polarisierte Welle (V). Der zweite Buchstabe gibt Auskunft über die Stärke der empfangenen Welle in vertikaler (V) oder horizontaler (H) Polarisation. Während im VV Kanal demnach die Polarisationsrichtung erhalten bleibt, erfasst der VH Kanal die gedrehte Komponente der Welle. Der VH Kanal ist daher besonders empfindlich gegenüber der geometrischen Anordnung der Streuobjekte, da nur komplex strukturierte Objekte wie Bäume oder Gebäude in der Lage sind, einen großen Teil der einfallenden Welle zu drehen. Deshalb erlauben Falschfarbenbilder, die unterschiedliche Kombinationen dieser beiden Messungen zeigen, eine Differenzierung vergleichsweise glatter Flächen wie Asphalt oder Wasserflächen von vergleichsweise komplexen Streuern wie hohe Vegetation oder Gebäuden (Abbildung 2).

Das meines Wissens nach erste globale SAR Mosaik wurde im Jahr 2012 an der TU Wien im Auftrag der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA in Vorbereitung auf den Betrieb der Sentinel-1 Satelliten erstellt. Dieses hatte eine grobe räumliche Auflösung von 1 km und wurde anhand von ca. 110 000 SAR Szenen, aufgenommen durch den ENVISAT Satelliten, erzeugt [15]. Basierend auf Sentinel-1 Aufnahmen aus den Jahren 2016 und 2017 ist es uns in einem weiteren von der ESA finanzierten Projekt gelungen ein globales SAR Mosaik bei einer räumlichen Auflösung von 10 m

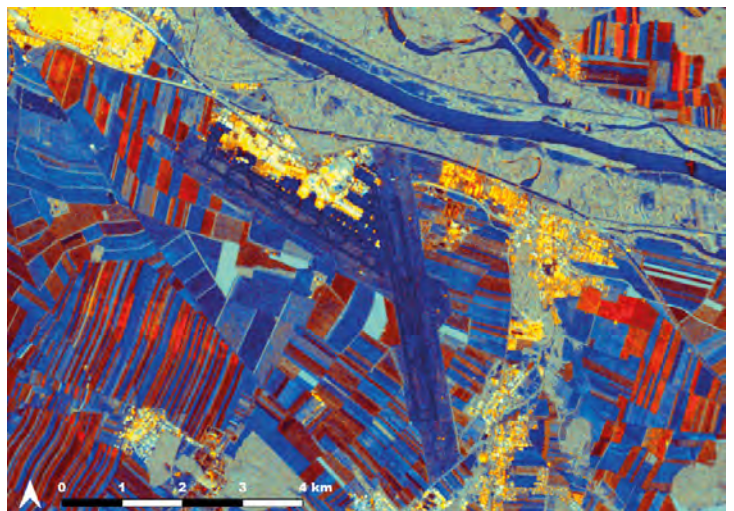


Abb. 2: Falschfarbenbild (Rot: VV Polarisation, Grün: VH Polarisation, Blau: VH/VV) für die Region rund um den Flughafen Wien basierend auf Sentinel-1 Mittelwertbildern für den Monat Mai 2019



Abb. 3: Visualisierung eines globalen Sentinel-1 Rückstreumodells auf <https://s1map.eodc.eu/>

in beiden Polarisationen (VV und VH) zu erstellen [23]. Dafür wurden am VSC an die 500 000 Sentinel-1 Szenen aus dem EODC Datenarchiv verarbeitet und so aufbereitet, dass Streifenmuster aufgrund der Sentinel-1 Orbits so weit als möglich reduziert wurden. Die Daten können vom TU Datenrepositorium frei bezogen werden [24]. Auf globaler Ebene spiegelt die in Abbildung 3 gezeigte Visualisierung des Sentinel-1 Mosaiks vor allem Unterschiede aufgrund der Vegetation wieder. Die niedrigsten Rückstreuwerte über Land sind in Sandwüsten zu finden, da die Radarpulse tief in den Sand eindringen können und dort absorbiert werden. Die höchsten Werte findet man über tropischen Regenwäldern bzw. über rauen Gesteinsoberflächen. Je mehr man in das Mosaik hineinzoomt, umso deutlicher treten die anthropogenen Veränderungen hervor: Zuerst die großen urbanen Zentren, dann landwirtschaftliche Strukturen und Bewässerungssysteme und zum Schluss sogar einzelne Infrastrukturanlagen wie Hochspannungsleitungen oder Windräder.

4. Vegetation

Wie bereits oben erwähnt hängt die von Sentinel-1 gemessene Rückstreuung von der Vegetation ab. Aufgrund der komplexen Interaktionsmechanismen der Radarpulse mit der Vegetation und Sättigungseffekten bei höheren Biomasseniveaus ist es aber leider schwierig, nur anhand einzelner SAR Bilder quantitative Zusammenhänge zu Vegetationsgrößen wie Baumhöhen, Stammvolumen, Biomasse oder Vegetationswassergehalt herzustellen [25, 26]. Vielversprechender sind Ansätze, die anhand der Dynamik der SAR Zeitreihen die Phänologie der Vegetation abbilden [27]. So wirkt sich zum Beispiel der jahreszeitliche

Wechsel auf die Rückstreuung von Nadel- und Laubwald sehr unterschiedlich aus. Während die Rückstreuung über Nadelwald im Frühjahr mit dem Wachstum neuer Triebe wie erwartet zunimmt, sinkt sie über Laubwald [28]. Der Grund dafür liegt in der sehr starken Rückstreuung durch Äste und Zweige, die durch das Wachsen neuer Blätter deutlich gedämpft wird. Durch Ausnutzen dieses Effekts ist es Dostálová et al. [29] gelungen, Nadel- und Laubwald für ganz Europa nur anhand von Sentinel-1 Zeitreihen zu kartieren.

SAR Zeitserienanalysen sind auch in der Landwirtschaft von höchstem Nutzen. So eignet sich zum Beispiel die Polarisationsratio VH/HH sehr gut für die Erfassung der Phänologie landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und deren Wassergehalt [31]. Dank moderner Verfahren der Künstlichen Intelligenz und frei zur Verfügung stehender landwirtschaftlicher Daten können auch noch relativ kleine Unterschiede in den Rückstreueigenschaften verschiedener Pflanzen erkannt werden [30]. Damit ist es möglich, verschiedene Getreidesorten und andere Nutzpflanzen großflächig zu kartieren (Abbildung 4). Von speziell großem Nutzen sind die Sentinel-1 Daten für die Erfassung von Reis-anbauflächen. Dies liegt daran, dass bei einem nassen Anbau das Radarsignal über den Wachstumszyklus sehr stark nach einem bekannten zeitlichen Muster variiert [32]. Sind für verschiedene Regionen die ungefähren Zeiträume für die Aussaat bekannt, so ist es möglich Reisflächen über viele Regionen und Länder hinweg automatisch zu klassifizieren [33].

5. Überflutungen und Feuchtgebiete

Die Rückstreuung von offenen Wasserflächen ist in der Regel sehr niedrig. Der Grund liegt darin, dass eine glatte Wasseroberfläche die vom SAR Sensor kommenden Mikrowellenpulse wie ein Spiegel nach vorne reflektiert und somit keine Strahlung zum Sensor zurück gestreut wird. Deshalb heben sich Wasserkörper in Sentinel-1 Bildern in der Regel gut vom umliegenden Land ab. Fehlklassifikationen können aber auftreten, wenn durch Wind verursachte Wellen die Rückstreuung über Wasser erhöhen oder wenn die Rückstreuung von umliegenden Flächen sehr niedrig ist, wie dies über Sandwüsten und Asphaltflächen der Fall



Abb. 4: Beispiel für eine Klassifikation landwirtschaftlicher Flächen basierend auf Sentinel-1 Zeitserien mittels eines Neuronalen Netzwerkes [30]

sein kann [34]. Des Weiteren sind Wasserflächen in Städten und dichter Vegetation oft schwer oder gar nicht zu erkennen. Nichtsdestotrotz eignet sich Sentinel-1 speziell für die rasche Dokumentation von Überflutungsflächen [35]. Seit Ende 2021 verwendet das Copernicus Emergency Management Service die Sentinel-1 Aufnahmen zur vollständig automatischen Erfassung von Flutereignissen weltweit. Einer der dabei eingesetzten Algorithmen wurde von der TU Wien entwickelt [36, 37]. Mit Hilfe dieses operationellen Service konnte das Ausmaß der verheerenden Flut in Pakistan 2022 dokumentiert werden (Abbildung 5).

Während Pakistan unter der Flut litt, war es im Sommer 2022 in vielen Teilen Europas zu trocken. So erreichte der Neusiedler See seinen tiefsten Wasserstand seit Beginn der Aufzeichnungen

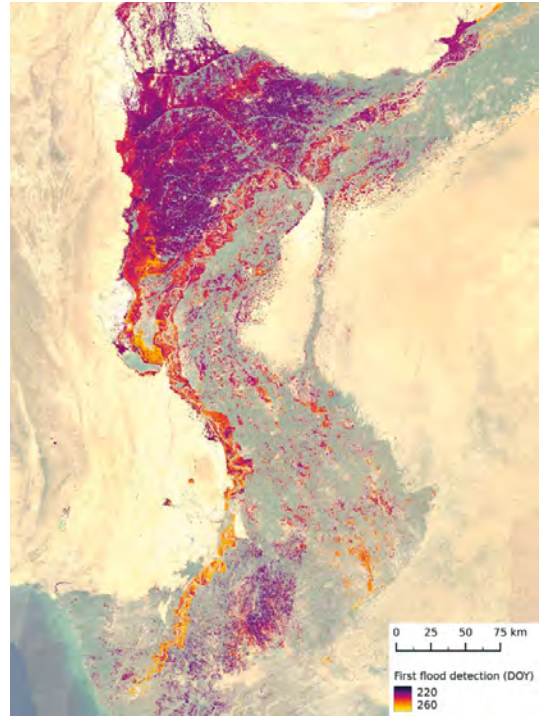


Abb. 5: Im August und September 2022 wurde in Pakistan eine Fläche von über 30 000 km² überflutet [38]. Die Abbildung zeigt das durch Sentinel-1 erfasste Fortschreiten der Flut (DOY = Day of Year).

1965. Wie das in Abbildung 6 gezeigte Sentinel-1 Falschfarbenbild dokumentiert, sind große Flächen im Schilfgürtel und Teile der Lacken ausgetrocknet. Diese Flächen erkennt man an den roten



Abb. 6: Sentinel-1 Falschfarbenbild basierend auf Mittelwerten der VH Rückstreumessungen für die Monate Juli 2022 (Rot), Juli 2019 (grün) und Juli 2015 (Blau)

Tönen, die anzeigen wo sich 2022 das Wasser im Vergleich zu den beiden nasser Jahren 2019 und 2015 zurückgezogen hat. Dieses Beispiel illustriert wie Sentinel-1 zur Beobachtung von Nass- und Trockenphasen in Feuchtgebieten eingesetzt werden kann. Wie bereits Schläffer et al. [39] für drei Feuchtgebiete in Sambia gezeigt hat, können damit funktional unterschiedliche Feuchtlandzonen unterschieden werden.

6. Bodenfeuchtigkeit

Sentinel-1 arbeitet bei einer Frequenz von 5.4 GHz (C-Band), bei der flüssiges Wasser aufgrund des permanenten Dipolmoments von Wassermolekülen besondere Absorptions- und Reflexionseigenschaften zeigt. Daher erhöht sich im Regelfall die von Sentinel-1 gemessene Rückstreuung je mehr Wasser sich im Boden befindet. Die Ausnahme bilden trockene und sandige Böden, in die das Signal tief eindringt und auf Fels oder Steine trifft, was bei einer zunehmenden Austrocknung der Böden den Rückstreukoeffizienten erhöhen kann [40, 41]. Um die Bodenfeuchtigkeit aus den SAR Daten abzuschätzen muss man aber noch weitere Einflussgrößen auf das Signal berücksichtigen, allen voran die Rauigkeit der Bodenoberfläche und die Vegetation. Für die Beschreibung all dieser Faktoren werden in der Regel Strahlungstransportmodelle verwendet, die einen quantitativen Zusammenhang der Rückstreuung und der Bodenfeuchtigkeit herstellen [42]. In den letzten Jahren haben aber auch statistische Verfahren, in denen Neuronale Netze oder andere Machine Learning Algorithmen mit Hilfe umfangreicher Referenzdaten trainiert werden, immer breitere Verwendung gefunden [43]. An der TU Wien verwenden wir einen Change Detection Ansatz, der ursprünglich für ENVISAT entwickelt wurde [44, 45] und später schrittweise für Sentinel-1 angepasst wurde [46, 47]. Dieser Algorithmus ist die Basis für das 1 km Sentinel-1 Bodenfeuchtigkeitsprodukt, das seit 2018 vom Copernicus Land Monitoring Service täglich für Europa berechnet wird. Um diese Methode weiter zu verbessern untersuchen wir gerade neue Ansätze zur Beschreibung der Vegetation und Bodenrückstreuung [48]. Die Analyse dieser neuesten Forschungsergebnisse zeigte unter anderem die extreme Trockenheit in Norditalien (Abbildung 7), die im Sommer 2022 zu einem historischen Tiefststand im Abfluss des für die Region so wichtigen Flusses Po führte.

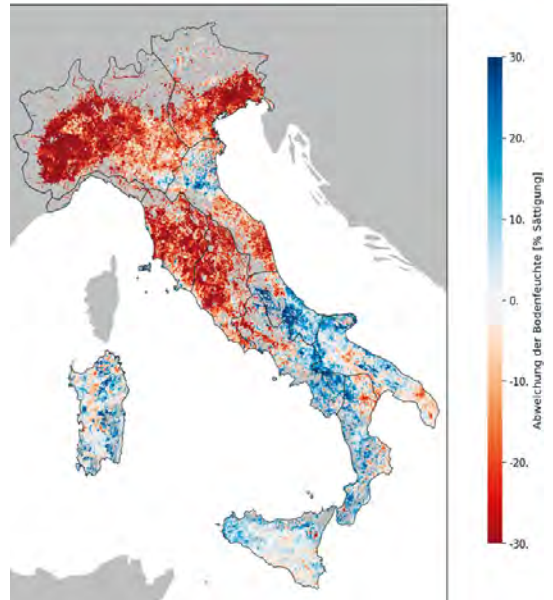


Abb. 7: Abweichung der Bodenfeuchtigkeit im Juni 2022 (Dürre) im Vergleich zu Juni 2020 (normales Jahr)

7. Ausblick

Die Sentinel-1 Daten zeigen eindrücklich, wie sehr die Menschheit sich die Erde schon zu eigen gemacht hat. Städte und Landwirtschaft drängen bis in aride Regionen vor und Bewässerungssysteme prägen in vielen dichtbevölkerten Regionen die Landschaft. Wetterextreme nehmen, wie von den Klimamodellen vorhergesagt und durch Erdbeobachtungssatelliten dokumentiert, rasch zu. Eindrückliche Beispiele waren die im Sommer 2022 von Sentinel-1 dokumentierte Flut in Pakistan, die Dürre in der Po Ebene und das Austrocknen des Schilfgürtels rund um den Neusiedlersee. An der TU Wien werden wir gemeinsam mit dem EODC und unseren wissenschaftlichen Partnern weiter an der laufenden Verbesserung der Sentinel-1 Algorithmen arbeiten, um die bestehenden operationellen Copernicus Services zu verbessern und neuartige Datenprodukte zu entwickeln. Gleichzeitig werden wir uns auf den Start der nächsten Generation europäischer SAR Satelliten vorbereiten, allen voran Sentinel-1 Next Generation und ROSE-L (Radar Observing System for Europe - L-Band). Wir erwarten uns speziell durch die gleichzeitige Verwendung zweier Frequenzen (5.4 GHz und 1.25 GHz) eine deutliche Verbesserung bei der Erfassung dynamischer Veränderungen der Landoberfläche.

Danksagung

Die in diesem Überblicksartikel vorgestellten Forschungsergebnisse sind das Ergebnis jahrelanger, vor allem von der TU Wien, FFG, BMK, BMBWF, ESA und der Europäischen Kommission unterstützten Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Die präsentierten Rechenergebnisse wurden zum Teil am Vienna Scientific Cluster (VSC) erzielt. Für die Erstellung der Abbildungen bedanke ich mich bei Claudio Navacchi, Felix Reuß, Florian Roth, Raphael Quast, Mariette Vreugdenhil und Bernhard Bauer-Marschallinger.

Referenzen

- [1] P.J. Crutzen, Geology of mankind, *Nature*, 415 (2002) 23-23.
- [2] W. Steffen, P.J. Crutzen, J.R. McNeill, The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36 (2007) 614-621.
- [3] R.B. Jackson, P. Friedlingstein, C. Le Quéré, S. Abernethy, R.M. Andrew, J.G. Canadell, P. Ciais, S.J. Davis, Z. Deng, Z. Liu, J.I. Korsbakken, G.P. Peters, Global fossil carbon emissions rebound near pre-COVID-19 levels, *Environ. Res. Lett.*, 17 (2022) 031001.
- [4] W.F. Ruddiman, The Anthropocene, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 41 (2013) 45-68.
- [5] X.-P. Song, M.C. Hansen, S.V. Stehman, P.V. Potapov, A. Tyukavina, E.F. Vermote, J.R. Townshend, Global land change from 1982 to 2016, *Nature*, 560 (2018) 639-643.
- [6] F. Creutzig, C. Bren d'Amour, U. Weddige, S. Fuss, T. Beringer, A. Gläser, M. Kalkuhl, J.C. Steckel, A. Radebach, O. Edenhofer, Assessing human and environmental pressures of global land-use change 2000–2010, *Glob. Sustain.*, 2 (2019) e1.
- [7] J. van Zalk, P. Behrens, The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S., *Energy Policy*, 123 (2018) 83-91.
- [8] B. Zheng, P. Ciais, F. Chevallier, E. Chuvieco, Y. Chen, H. Yang, Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area, *Sci. Adv.*, 7 (2021) eabh2646.
- [9] T. Hlásny, L. König, P. Krokene, M. Lindner, C. Montagné-Huck, J. Müller, H. Qin, K.F. Raffa, M.-J. Schelhaas, M. Svoboda, H. Viiri, R. Seidl, Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management, *Curr Forestry Rep.*, 7 (2021) 138-165.
- [10] G.R. Koboltschnig, W. Schöner, The relevance of glacier melt in the water cycle of the Alps: the example of Austria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15 (2011) 2039-2048.
- [11] A.K. Agnihotri, A. Ohri, S. Gaur, Shivam, N. Das, S. Mishra, Flood inundation mapping and monitoring using SAR data and its impact on Ramganga River in Ganga basin, *Environ Monit Assess.*, 191 (2019) 760.
- [12] P. Bauer, B. Stevens, W. Hazeleger, A digital twin of Earth for the green transition, *Nat. Clim. Chang.*, 11 (2021) 80-83.
- [13] M. Tomko, S. Winter, Beyond digital twins – A commentary, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46 (2019) 395-399.
- [14] R. Torres, P. Snoeij, D. Geudtner, D. Bibby, M. Davidson, E. Attema, P. Potin, B. Rommen, N. Floury, M. Brown, I.N. Traver, P. Deghaye, B. Duesmann, B. Rosich, N. Miranda, C. Bruno, M. L'Abbate, R. Croci, A. Pietropaolo, M. Huchler, F. Rostan, GMES Sentinel-1 mission, *Remote Sensing of Environment*, 120 (2012) 9-24.
- [15] D. Sabel, Z. Bartalis, W. Wagner, M. Doubkova, J.-P. Klein, Development of a Global Backscatter Model in support to the Sentinel-1 mission design, *Remote Sensing of Environment*, 120 (2012) 102-112.
- [16] W. Wagner, B. Bauer-Marschallinger, C. Navacchi, F. Reuß, S. Cao, C. Reimer, M. Schramm, C. Briese, A Sentinel-1 Backscatter Datacube for Global Land Monitoring Applications, *Remote Sensing*, 13 (2021) 4622.
- [17] W. Wagner, J. Fröhlich, G. Wotawa, R. Stowasser, M. Staudinger, C. Hoffmann, A. Walli, C. Federspiel, M. Aspetsberger, C. Atzberger, C. Briese, C. Notarnicola, M. Zebisch, A. Boresch, M. Enekel, R. Kidd, A. von Beringe, S. Hasenauer, V. Naeimi, W. Mücke, Addressing Grand Challenges in Earth Observation Science: The Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring, ISPRS Technical Commission VII Symposium (Volume II-7) - 29 September–2 October 2014, Istanbul, Turkey, Copernicus GmbH, 2014, pp. 81-88.
- [18] M. Tupas, C. Navacchi, F. Roth, B. Bauer-Marschallinger, F. Reuß, W. Wagner, Computing global harmonic parameters for flood mapping using TU Wien's SAR datacube software stack, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-4/W1-2022 (2022) 495-502.
- [19] M. Schramm, E. Pebesma, M. Milenković, L. Foresta, J. Dries, A. Jacob, W. Wagner, M. Mohr, M. Neteler, M. Kadunc, T. Miksa, P. Kempeneers, J. Verbesselt, B. Gößwein, C. Navacchi, S. Lippens, J. Reiche, The openEO API—Harmonising the Use of Earth Observation Cloud Services Using Virtual Data Cube Functionalities, *Remote Sensing*, 13 (2021) 1125.
- [20] B. Bauer-Marschallinger, D. Sabel, W. Wagner, Optimisation of global grids for high-resolution remote sensing data, *Computers & Geosciences*, 72 (2014) 84-93.
- [21] C. Navacchi, S. Cao, B. Bauer-Marschallinger, P. Snoeij, D. Small, W. Wagner, Utilising Sentinel-1's orbital stability for efficient pre-processing of sigma nought backscatter, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 192 (2022) 130-141.
- [22] A. Dostalova, C. Navacchi, I. Greimeister-Pfeil, D. Small, W. Wagner, The effects of radiometric terrain flattening on SAR-based forest mapping and classification, *Remote Sensing Letters*, 13 (2022) 855-864.
- [23] B. Bauer-Marschallinger, S. Cao, C. Navacchi, V. Freeman, F. Reuß, D. Geudtner, B. Rommen, F.C. Vega, P. Snoeij, E. Attema, C. Reimer, W. Wagner, The normalised Sentinel-1 Global Backscatter Model, mapping Earth's land surface with C-band microwaves, *Sci Data*, 8 (2021) 277.
- [24] B. Bauer-Marschallinger, S. Cao, C. Navacchi, V. Freeman, F. Reuß, D. Geudtner, B. Rommen, F.C. Vega, P. Snoeij, E. Attema, C. Reimer, W. Wagner, <https://researchdata.tuwien.ac.at/records/n2d1v-gqb91>, 2021.
- [25] W. Wagner, A. Luckmann, J. Vietmeier, K. Tansey, H. Balzter, C. Schmillius, M. Davidson, D. Gaveau, M. Gluck, T. Le Toan, S. Quegan, A. Shvidenko, A. Wiesmann, J.J. Yu, Large-scale mapping of boreal forest in SIBERIA using ERS tandem coherence and JERS backscatter data, *Remote Sensing of Environment*, 85 (2003) 125-144.

- [26] K.J. Tansey, A.J. Luckman, L. Skinner, H. Balzter, T. Strozzi, W. Wagner, Classification of forest volume resources using ERS tandem coherence and JERS backscatter data, *International Journal of Remote Sensing*, 25 (2004) 751-768.
- [27] M. Vreugdenhil, C. Navacchi, B. Bauer-Marschallinger, S. Hahn, S. Steele-Dunne, I. Pfeil, W. Dorigo, W. Wagner, Sentinel-1 Cross Ratio and Vegetation Optical Depth: A Comparison over Europe, *Remote Sensing*, 12 (2020) 3404.
- [28] A. Dostálová, W. Wagner, M. Milenković, M. Hollaus, Annual seasonality in Sentinel-1 signal for forest mapping and forest type classification, *International Journal of Remote Sensing*, 39 (2018) 7738-7760.
- [29] A. Dostálová, M. Lang, J. Ivanovs, L.T. Waser, W. Wagner, European Wide Forest Classification Based on Sentinel-1 Data, *Remote Sensing*, 13 (2021) 337.
- [30] F. Reuß, I. Greimeister-Pfeil, M. Vreugdenhil, W. Wagner, Comparison of Long Short-Term Memory Networks and Random Forest for Sentinel-1 Time Series Based Large Scale Crop Classification, *Remote Sensing*, 13 (2021) 5000.
- [31] M. Vreugdenhil, W. Wagner, B. Bauer-Marschallinger, I. Pfeil, I. Teubner, C. Rüdiger, P. Strauss, Sensitivity of Sentinel-1 Backscatter to Vegetation Dynamics: An Austrian Case Study, *Remote Sensing*, 10 (2018) 1396.
- [32] D.B. Nguyen, A. Gruber, W. Wagner, Mapping rice extent and cropping scheme in the Mekong Delta using Sentinel-1A data, *Remote Sensing Letters*, 7 (2016) 1209-1218.
- [33] D.B. Nguyen, W. Wagner, European Rice Cropland Mapping with Sentinel-1 Data: The Mediterranean Region Case Study, *Water*, 9 (2017) 392.
- [34] J. Zhao, R. Pelich, R. Hostache, P. Matgen, S. Cao, W. Wagner, M. Chini, Deriving exclusion maps from C-band SAR time-series in support of floodwater mapping, *Remote Sensing of Environment*, 265 (2021) 112668.
- [35] W. Wagner, V. Freeman, S. Cao, P. Matgen, M. Chini, P. Salamon, N. McCormick, S. Martinis, B. Bauer-Marschallinger, C. Navacchi, M. Schramm, C. Reimer, C. Briese, Data processing architectures for monitoring floods using Sentinel-1, XXIV ISPRS Congress, Commission III (Volume V-3-2020) - 2020 edition, Copernicus GmbH, 2020, pp. 641-648.
- [36] S. Schlaffer, P. Matgen, M. Hollaus, W. Wagner, Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38 (2015) 15-24.
- [37] B. Bauer-Marschallinger, S. Cao, M.E. Tupas, F. Roth, C. Navacchi, T. Melzer, V. Freeman, W. Wagner, Satellite-Based Flood Mapping through Bayesian Inference from a Sentinel-1 SAR Datacube, *Remote Sensing*, 14 (2022) 3673.
- [38] F. Roth, B. Bauer-Marschallinger, M.E. Tupas, C. Reimer, P. Salamon, W. Wagner, Sentinel-1 based analysis of the Pakistan Flood in 2022, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, submitted (2022).
- [39] S. Schlaffer, M. Chini, D. Dettmering, W. Wagner, Mapping Wetlands in Zambia Using Seasonal Backscatter Signatures Derived from ENVISAT ASAR Time Series, *Remote Sensing*, 8 (2016) 402.
- [40] K. Morrison, W. Wagner, Explaining Anomalies in SAR and Scatterometer Soil Moisture Retrievals From Dry Soils With Subsurface Scattering, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 58 (2020) 2190-2197.
- [41] W. Wagner, R. Lindorfer, T. Melzer, S. Hahn, B. Bauer-Marschallinger, K. Morrison, J.-C. Calvet, S. Hobbs, R. Quast, I. Greimeister-Pfeil, M. Vreugdenhil, Widespread occurrence of anomalous C-band backscatter signals in arid environments caused by subsurface scattering, *Remote Sensing of Environment*, 276 (2022) 113025.
- [42] R. Quast, W. Wagner, Analytical solution for first-order scattering in bistatic radiative transfer interaction problems of layered media, *Appl. Opt.*, 55 (2016) 5379.
- [43] F. Greifeneder, C. Notarnicola, W. Wagner, A Machine Learning-Based Approach for Surface Soil Moisture Estimations with Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 13 (2021) 2099.
- [44] C. Pathe, W. Wagner, D. Sabel, M. Doubkova, J.B. Barbara, Using ENVISAT ASAR Global Mode Data for Surface Soil Moisture Retrieval Over Oklahoma, USA, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47 (2009) 468-480.
- [45] A. Dostálová, M. Doubková, D. Sabel, B. Bauer-Marschallinger, W. Wagner, Seven Years of Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) Global Monitoring (GM) of Surface Soil Moisture over Africa, *Remote Sensing*, 6 (2014) 7683-7707.
- [46] M. Hornacek, W. Wagner, D. Sabel, H.-L. Truong, P. Snoeij, T. Hahmann, E. Diedrich, M. Doubkova, Potential for High Resolution Systematic Global Surface Soil Moisture Retrieval via Change Detection Using Sentinel-1, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*, 5 (2012) 1303-1311.
- [47] B. Bauer-Marschallinger, V. Freeman, S. Cao, C. Paulik, S. Schaufner, T. Stachl, S. Modanesi, C. Massari, L. Ciabatta, L. Brocca, W. Wagner, Toward Global Soil Moisture Monitoring With Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 57 (2019) 520-539.
- [48] R. Quast, C. Albergel, J.-C. Calvet, W. Wagner, A Generic First-Order Radiative Transfer Modelling Approach for the Inversion of Soil and Vegetation Parameters from Scatterometer Observations, *Remote Sensing*, 11 (2019) 285.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Wagner, Technische Universität Wien, Department Geodäsie und Geoinformation, Wiedner Hauptstraße 8-10, 1040 Wien.
E-Mail: wolfgang.wagner@geo.tuwien.ac.at