

HEC-RAS-Simulation einer Glacial Lake Outburst Flood zur Ermittlung von möglichen Auswirkungen am Beispiel des Chamlang North Tsho (Lake 464) im Hongu Valley, Nepal

NIELS DEDRING¹, VALERIE GRAW¹ & ANDREAS RIENOW¹

Zusammenfassung: Eine „Glacial Lake Outburst Flood“ (GLOF) beschreibt das rapide Abfließen eines Gletschersees, beispielsweise durch Einsturz und Erosion der ehemaligen Endmoräne, welche den See aufstaut. GLOFs werden in der Regel durch Lawinen und Fels-/Steinschlag oder Kombination verschiedener Ereignisse ausgelöst. Dabei ereignen sich über ein Drittel aller weltweiten GLOFs in der Hindukusch-Himalaya Region. Ziel dieser Arbeit ist es, das GLOF-Risiko und die etwaigen Auswirkungen des Chamlang North Tsho (Lake 464), welcher sich ca. 23 km südlich des Mount Everest befindet, zu analysieren. Hierzu wurden unter anderem die aktuelle Entwicklung des Sees auf Grundlage von Sentinel 1 Aufnahmen betrachtet sowie verschiedene GLOF-Szenarien mittels der Software HEC-RAS entwickelt.

1 Einleitung

Eine sogenannte „Glacial Lake Outburst Flood“ (GLOF) beschreibt den plötzlichen Wasseraustritt eines Gletschersees unabhängig von der Ursache oder dem Auslösemechanismus. Dabei können Abflüsse von mehreren zehntausend Kubikmetern pro Sekunde erreicht und wiederum durch das hohe Erosions- und Transportpotenzial Murgänge bzw. Schlammlawinen mit einem Volumen von über mehreren Millionen Kubikmetern ausgelöst werden. Hauptursache für den Dambruch dieser Seen sind in der Regel gravitative Massenbewegungen, vorrangig Lawinen, aber auch Fels- und Steinstürze, Hangrutschungen, Extremwetterereignisse, Erdbeben oder vorausgehende GLOFs, welche rasch in den Gletschersee stürzen, eine tsunamähnliche Flutwelle initiieren und durch Überschwappen („Overtopping“) den Damm/Moräne durch Erosion zum Einsturz bringen (ROUNCE et al. 2017). Die hierdurch ausgelöste Flutwelle kann Distanzen von weit über 100 km zurücklegen und stellt eine große sozio-ökonomische Gefahr für die flussabwärts lebende Bevölkerung, die angrenzenden Dörfer und Infrastruktur dar (HARRISON et al. 2018; MASKEY et al. 2020). Nach HARRISON et al. (2018) haben sich mit mehr als einem Drittel aller GLOFs (55 von 160) die meisten in der Hindukush-Himalaya Region ereignet. Ein vergleichsweise unerforschter Gletschersee mit einem wahrscheinlich hohem Risikopotential für eine zukünftige GLOF befindet sich ca. 23 km südlich des Mount Everest im Hongu Valley und ist als „Chamlang North Tsho“ oder „Lake 464“ bekannt (BYERS et al. 2013). Ziel ist es, die aktuelle Entwicklung durch Radarfernerkundung darzustellen und anschließend mit der Wasserhydraulik-Modellierungssoftware HEC-RAS mögliche GLOF-Szenarien und ihre Auswirkungen zu entwickeln. Der Chamlang North Tsho liegt bei 27.7838776° NB und 86.9562533° ÖL in einer Höhe von 5185 m über N. N. im Hongu Valley der Mahakulung Gemeinde und ist damit dem Distrikt Solukhumbu der Provinz Nr. 1, im Osten Nepals zugehörig. Einer der hier möglichen GLOF-Auslöser stellen

¹ Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Universitätsstraße 150, D-44801 Bochum, E-Mail: niels.dedring@ruhr-uni-bochum.de

Eisfelder und Überhänge an der Nordwand des Chamlang dar, welche in den See stürzen könnten. Den jedoch mit Abstand häufigsten Auslöser für GLOFs im Himalaya und damit auch für den Chamlang North Tsho bilden Lawinenabgänge (WANG et al. 2011; MOHANTY & MAITI 2021). Nach LALA et al. (2018) weisen Hangneigungen von 45° bis 60° eine erhöhte Lawinengefährdung auf, was übertragen auf den Chamlang North Tsho eine gefährdete Fläche von insgesamt ca. 2,69 km² ergibt.

2 Methodologie

Für die nachfolgende Analyse des Chamlang North Tsho hinsichtlich seiner aktuellen Größe und Entwicklung in den letzten Jahren sowie der GLOF-Simulation wurden ausschließlich kostenfreie und frei verfügbare Daten verwendet. Die Analyse ist dabei unterteilt in zwei Teilanalysen. Erstens der Ermittlung der aktuellen Ausdehnung des Sees und seiner Entwicklung der letzten Jahre (Kapitel 2.1) und zweitens einer GLOF-Modellierung und Simulation des Chamlang North Tsho (Kapitel 2.2). Die beiden Kapitel sind aufeinander aufbauend und die Ergebnisse aus Kapitel 2.1 werden für die Simulation in Kapitel 2.2 verwendet.

2.1 Aktuelle Entwicklung des Chamlang North Tsho

2.1.1 Daten

Bei den verwendeten Daten handelt es sich um High Resolution Level-1 GRD Produkte des Sentinel-1A Satelliten aus den Jahren 2014 bis 2021. Für die Jahre 2015 bis 2021 stammen die Aufnahmen aus Anfang bis Ende September. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2014, da Sentinel-1A in diesem Jahr gestartet ist und die ersten Bilder des Untersuchungsgebietes erst im Oktober aufgenommen wurden. Zwischen Mitte November und Mitte Juni ist der See vollständig oder zumindest partiell von Eis bedeckt, wodurch bei dem gewählten Zeitraum (September und Oktober) eine Eisbedeckung ausgeschlossen werden kann (SENTINEL HUB 2021a; 2021b).

2.1.2 Methodik

Zur Vorverarbeitung der Sentinel-1A Daten wurde die Open Source Softwareanwendung SNAP verwendet. Die Abbildung 1 stellt die einzelnen Schritte schematisch dar. Das Vorgehen orientiert sich dabei an die empfohlene Praxis zur Hochwasserkartierung von UN-SPIDER (o.J.) und FILIPPONI (2019).



Abb. 1: Workflow zur Vorverarbeitung der Sentinel-1A Daten

2.2 Glacial Lake Outburst Flood Modellierung mit HEC-RAS

2.2.1 Daten

Kernkomponente für eine einfache GLOF-Simulation besteht unter anderem aus einem digitalen Geländemodell (DGM). Das hier verwendete DGM basiert auf radiometrisch geländekorrigierten Daten von ALOS PALSAR und wird von der Alaska Satellite Facility mit einer Auflösung von $12,5\text{ m} \times 12,5\text{ m}$ zur Verfügung gestellt (ASF 0.J.). Zur Darstellung der Landbedeckung wurde das ESA WorldCover 2020 verwendet. Es bietet eine globale Abdeckung mit einer Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ (ESA 2020). Diesem wurden Rauigkeitskoeffizienten basierend auf der MS-GAP und NLCD-Klassifizierung zugeordnet, da derzeit noch keine dedizierten Koeffizienten existieren (BUNYA et al. 2010). Ferner werden Daten zur aktuellen Seeoberfläche, Tiefe und Volumen des Sees benötigt bzw. hier aus den Ergebnissen aus Kapitel 2.1 numerisch ermittelt. Als Auslöser dienen drei verschiedene Lawinenszenarien, mit einer kleinen ($5 \times 10^4\text{ m}^3$), einer mittleren ($9 \times 10^5\text{ m}^3$) und einer großen ($6,6 \times 10^6\text{ m}^3$) Lawine. Selbige Größen wurden von LALA et al. (2018) für eine GLOF Modellierung des nahegelegenen Imja Lake verwendet. Zur Ermittlung potenzieller Auswirkungen und Schäden an Gebäuden, Brücken sowie Straßen und Wegen, werden anschließend OpenStreetMap-Daten mit den Ergebnissen der GLOF-Simulation verschnitten.

2.2.2 Methodik

Das schematische Vorgehen der HEC-RAS Analyse wird in Abbildung 2 vereinfacht dargestellt.

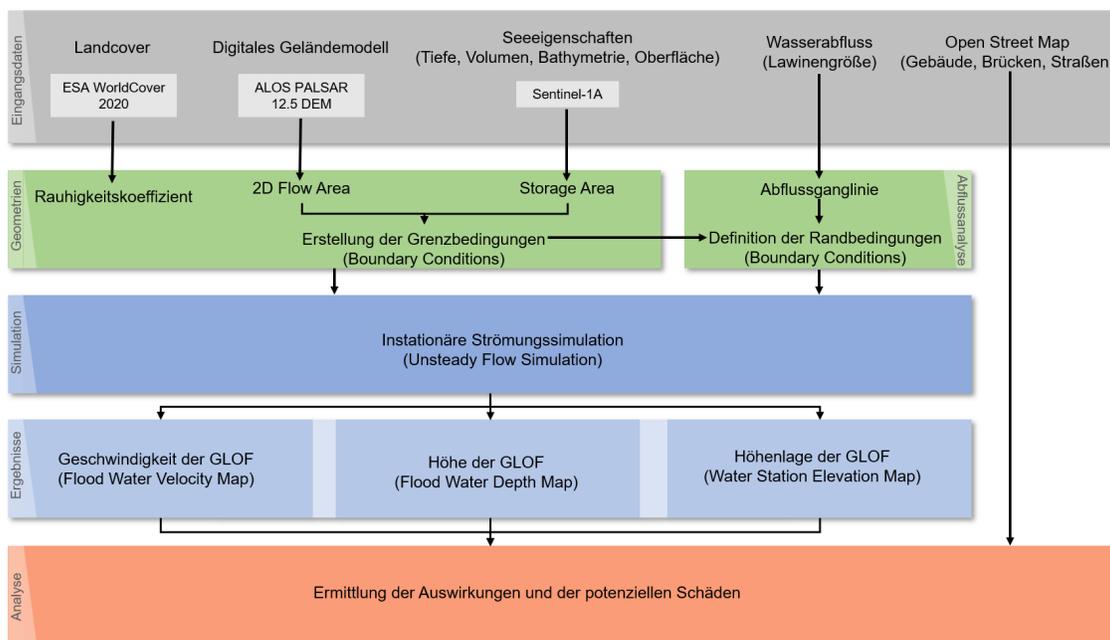


Abb. 2: Schematischer Ablauf der Analyse mit HEC-RAS

Die mittlere Tiefe wurde nach FUJITA et al. (2013) auf 53,45m ermittelt und durch den Vergleich mit dem benachbarten Chamlang South Tsho auf eine maximale Tiefe von 90 m geschätzt. Das Volumen wurde nach dem empirischen Modell von YAO et al. (2012) auf $44336925,34\text{ m}^3$

bestimmt. Auf Basis der ermittelten Parameter (Tiefe, Volumen) wurde eine exponentielle Volumen-/Höhenkurve erstellt und der Seegeometrie (Storage Area) zugeordnet. Das Zellennetz der 2D Flow Area wurde mit einer Auflösung von $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ sowie einer detaillierteren Auflösung von $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ im unmittelbaren Bereich des Flusslaufes generiert. Damit werden insgesamt 309754 einzelnen Zellen zur Berechnung der Simulation verwendet. Für die Berechnung eines Dammbrechens des Chamlang North Tsho wurde die Methode nach FROEHLICH (2008) verwendet. Hierbei wurde von einem „overtopping“ der Endmoräne und einer sinusartigen Erosion ausgegangen. Der hier berechnete Dammbbruch besitzt eine errechnete finale Dammbbruchbreite von 83 m, eine maximale Tiefe von 20 m, eine seitliche Neigung von 1, einen Bruch-Wehrkoeffizienten von 1,44 und eine gesamte Einsturzzeit von 1,41 Stunden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse aus Kapitel 2.1 sind in Abb. 3 dargestellt. Aufgrund von diversen Bildartefakten musste die Ermittlung des aktuellen Umfangs des Sees händisch erfolgen und konnte nicht automatisiert durchgeführt werden. Dabei ist ein geringer, aber positiver Anstieg in der Fläche zu erkennen. Trotz der damit verbundenen Subjektivität sowie der Bildartefakte hat sich die Radartechnik für diesen Untersuchungsraum als zuverlässig erwiesen. Dabei lagen hier essenzielle Vorteile gegenüber der optischen Fernerkundung in der Unabhängigkeit der Witterungsverhältnisse, insbesondere zur Monsunzeit, sowie in der Unabhängigkeit des Schattenwurfs des Chamlangs.

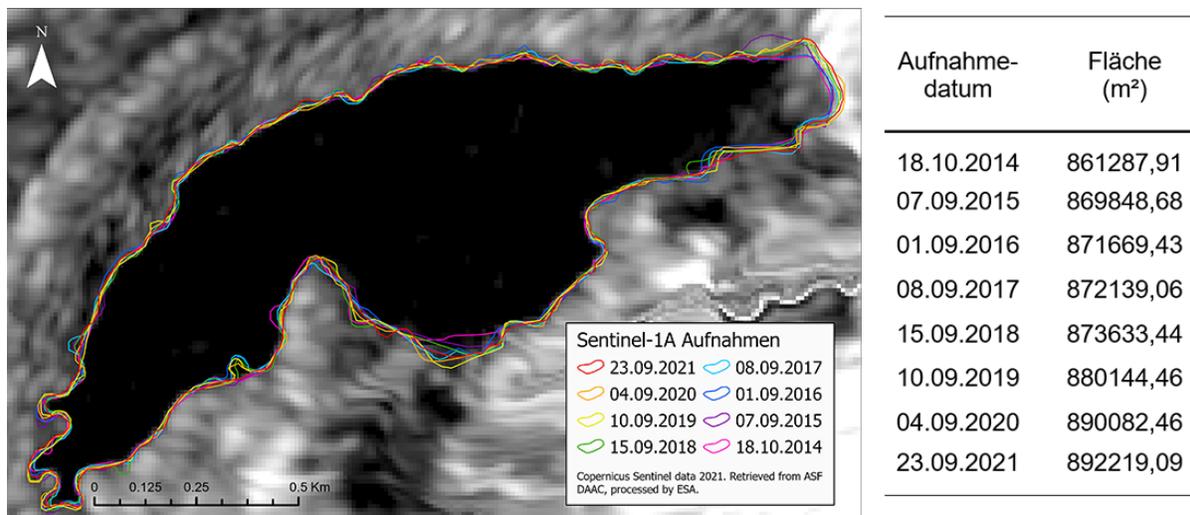


Abb. 3: Fläche des Chamlang North Tsho von 2014 bis 2021

Die Berechnung der GLOF-Simulation dauerte in Abhängigkeit der drei Lawinen-Szenarien, 7,3 Stunden, 13,65 Stunden bzw. 35,73 Stunden. Die endgültige geometrische Ausbreitung der Überflutungsszenarien sowie das ermittelte Schadensausmaß auf Basis von OSM-Daten sind in Abbildung 4 sowie Tabelle 1 aufgeführt. Eine Validierung der Ergebnisse ist unter anderem auf Grundlage mangelnder Datenlage sowie im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Die

einzigsten Studien, welche sich mit dem Chamlang North Tsho auseinandergesetzt haben, gehen auf BYERS et al. (2013), ROUNCE et al. (2016) und ROUNCE et al. (2017) zurück. Beim Vergleich der

Tab. 1: Räumliche Ausdehnung und potenzielle Schäden der drei GLOF Simulationen.

Lawinengröße (m³)	Entfernung zum See (m)	Fläche (km²)	Gebäude	Brücken	Straßen/Wege (km)
5×10^4	22,787	1,894	0	0	0,123
9×10^5	109,753	12,312	71	22	7,051
$6,6 \times 10^6$	147,256	35,729	235	30	28,752

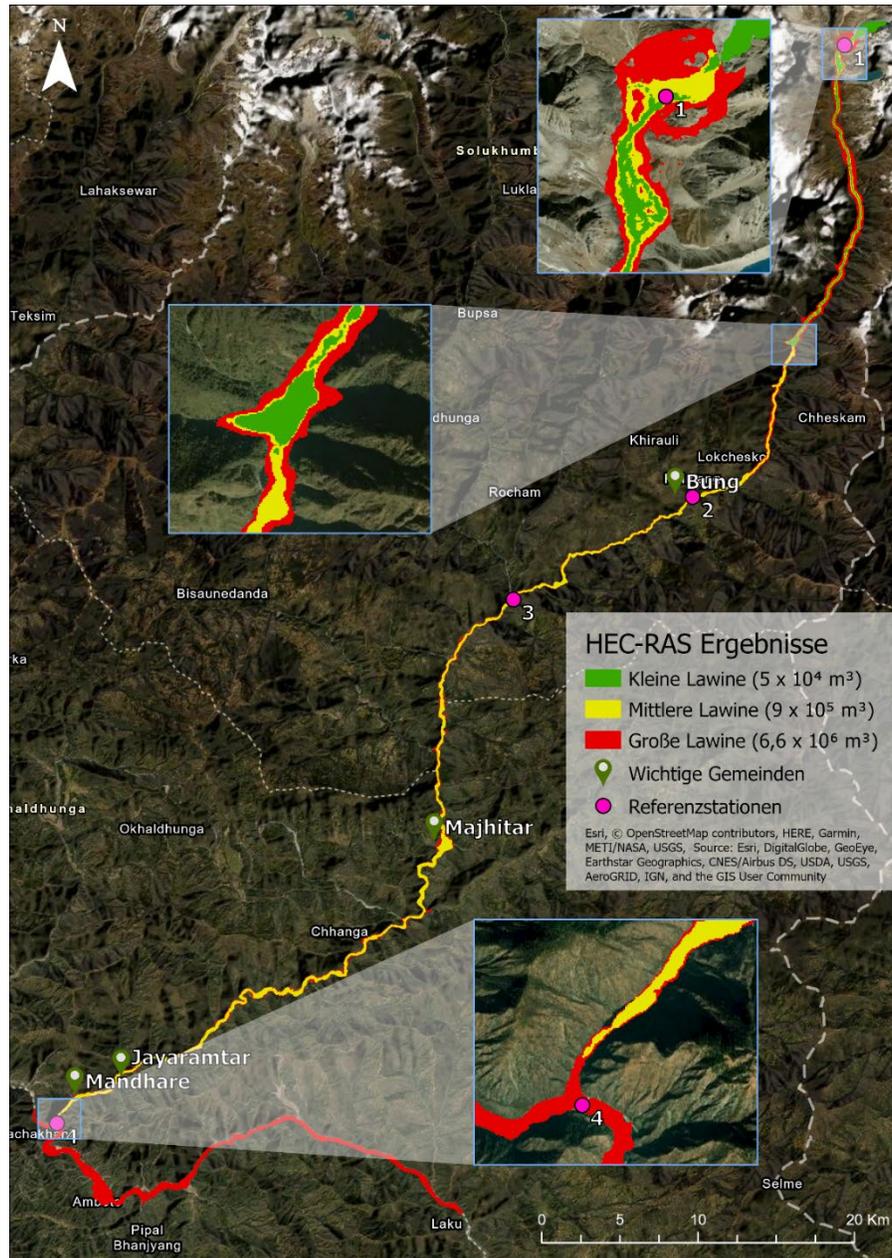


Abb. 4: Die Ergebnisse der GLOF-Simulationen.

Ergebnisse mit diesen Studien weist die Simulation unter dem mittleren Lawinen-Szenario die größte Annäherung an dessen Ergebnisse vor. Dabei kommt es in Teilaspekten der Simulation sowohl zur Über- als auch zu Unterschätzungen. Die Ähnlichkeit des mittleren-Szenarios mit anderen Studien zeigt jedoch auch, dass die Modellierung des kleinen Lawinen-Szenarios wahrscheinlich deutlich unterschätzt bzw. das große Lawinen-Szenario deutlich überschätzt. Unter Annahme der Ergebnisse konnte in Verbindung mit OSM-Daten ein grobes potenzielles Schadensbild ermittelt werden. Dieses kann zwar nicht vollumfänglich die gesamte Infrastruktur abbilden, aber dennoch erste Aussagen über die Vulnerabilität in den angrenzenden Dörfern zulassen. So weisen beispielsweise die Gemeinden „Bung“ und „Majhitar“, durch die Nähe zum See bzw. durch landwirtschaftliche Nutzung in unmittelbarer Flussnähe, eine hohe Vulnerabilität gegenüber einer GLOF auf. Zur Katastrophenvorsorge wäre eine Möglichkeit die Errichtung eines Frühwarnsystems in Verbindung mit einer Überwachungsstation am Chamlang North Tsho. Eine weitere Möglichkeit zur Risikominimierung stellt das Absenken des Wasserspiegels durch kontrolliertes Abtragen der Endmoräne dar. Dieses Vorgehen hat sich bereits am Thorthormi See im Buthan bewährt (WORLD WIDE FUND OF NATURE 2009). Für diese Studie mussten zahlreiche Annahmen, insbesondere durch mangelnde In-Situ Daten, getroffen werden, welche schlussendlich die Aussagekraft der Simulation limitiert. Es fehlt beispielsweise eine exakte Vermessung der Bathymetrie des Sees zur Volumenermittlung sowie der Zusammensetzung und Geometrie der Endmoräne. Des Weiteren fehlen genaue Rauigkeitskoeffizienten, sowie ein höher aufgelöstes DGM für das Untersuchungsgebiet. Mit ebendiesen Daten wäre es möglich, eine exaktere und komplexere Modellierung durchzuführen, um schlussendlich validere Ergebnisse zu erhalten.

4 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnte ein vereinfachter Weg aufgezeigt werden, eine GLOF-Simulation unter Verwendung von ausschließlich frei verfügbaren Daten und Softwareanwendungen (HEC-RAS) zu erstellen und erste Aussagen über dessen Verlauf und mögliche Auswirkungen abzuleiten. Diese Ergebnisse sind bereits ausreichend, um erste Schritte für Präventions- und Anpassungsmaßnahmen vor Ort einzuleiten. Dennoch mussten aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit diverse Annahmen getroffen werden, was wiederum zu Einschränkungen und Limitationen in den Ergebnissen führte. Um präzisere bzw. validere Aussagen treffen zu können, ist eine Expedition zum Chamlang North Tsho zur näheren Feldforschung unerlässlich. Im Fokus sollte eine genaue Vermessung der Bathymetrie des Sees sowie die Untersuchung des genauen Aufbaus der Endmoräne stehen. Darüber hinaus empfiehlt sich eine drohnengestützte Kartierung des Sees inklusive der näheren Umgebung, um anschließend ein hochauflösendes DGM und ein 3D-Modell zu generieren.

5 Literaturverzeichnis

- ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF), o. J.: ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction. <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radio-metric-terrain-correction/>, letzter Zugriff 01.02.2022.
- BUNYA, S., DIETRICH, J., WESTERINK, J., EBERSOLE, B., SMITH, J., ATKINSON, J., JENSEN, R., RESIO, D., LUETTICH, R., DAWSON, C., CARDONE, V., COX, A., POWELL, M., WESTERINK, H. & ROBERTS, H., 2010: A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation. *Monthly Weather Review*, **138**(2), 345-377, <https://doi.org/10.1175/2009MWR2906.1>.
- BYERS, A., MCKINNEY, D., SOMOS-VALENZUELA, M., WATANABE, T. & LAMSAL, D., 2013: Glacial lakes of the Hinku and Hongu valleys, Makalu Barun National Park and Buffer Zone, Nepal. *Natural Hazards*, **69**(1), 115-139, <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0689-8>.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2020: WorldCover Product User Manual. https://worldcover2020.esa.int/data/docs/WorldCover_PUM_V1.1.pdf, letzter Zugriff am 01.02.2022.
- FILIPPONI, F., 2019: Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *MDPI Proceedings*, **18**(11), 1-4, <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>.
- FROEHLICH, D. 2008: Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(12), 1708-1721, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)).
- FUJITA, K., SAKAI, A., TAKENAKA, S., NUIMURA, T., SURAZAKOV, A., SAWAGAKI, T. & YAMANOKUCHI, T., 2013: Potential flood volume of Himalayan glacial lakes. *Natural Hazards and Earth System Science*, **13**(7), 1827-1839, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1827-2013>.
- HARRISON, S., KARGEL, J., HUGGEL, C., REYNOLDS, J., SHUGAR, D., BETTS, R., EMMER, A., GLASSER, N., HARITASHYA, U., KLIMEŠ, J., REINHARDT, L., SCHAUB, Y., WILTSHIRE, A., REGMI, D. & VILÍMEK, V., 2018: Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, **12**(4), 1195-1209, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>.
- LALA, J., ROUNCE, D. & MCKINNEY, D., 2018: Modeling the glacial lake outburst flood process chain in the Nepal Himalaya: reassessing Imja Tsho's hazard. *Hydrology and Earth System Sciences* **22** (7), 3721-3737, <https://doi.org/10.5194/hess-22-3721-2018>.
- MASKEY, S., KAYASTHA, R. & KAYASTHA, R., 2020: Glacial Lakes Outburst Floods (GLOFs) modelling of Thulagi and Lower Barun Glacial Lakes of Nepalese Himalaya. *Progress in Disaster Science*, **7**(100106), 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100106>.
- MONHANTY, L. & MAITI, S., 2021: Probability of glacial lake outburst flooding in the Himalaya. *Resources, Environment and Sustainability*, **5**(100031), 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100031>.
- ROUNCE, D., MCKINNEY, D., LALA, J., BYERS, A. & WATSON, C., 2016: A new remote hazard and risk assessment framework for glacial lakes in the Nepal Himalaya. *Hydrology and Earth System Sciences*, **20**(9), 3455-3475, <https://doi.org/10.5194/hess-20-3455-2016>.
- ROUNCE, D., WATSON, C. & MCKINNEY, D., 2017: Identification of Hazard and Risk for Glacial Lakes in the Nepal Himalaya Using Satellite Imagery from 2000–2015. *Remote Sensing*, **9**(7), 654-673, <https://doi.org/10.3390/rs9070654>.

- SENTINEL HUB, 2021a: Sentinel-2 L2A. True Color. 2021-06-11. https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=15&lat=27.78658&lng=86.95868&themeId=DE-FAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fservices.sentinel-hub.com%2Fogc%2Fwms%2Fbd86bcc0-f318-402b-a145-015f85b9427e&datasetId=S2L2A&fromTime=2021-06-11T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2021-06-11T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR, letzter Zugriff 21.01.20220.
- SENTINEL HUB, 2021b: Sentinel-2 L2A. True Color. 2021-11-28. https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=15&lat=27.78656&lng=86.95868&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fservices.sentinel-hub.com%2Fogc%2Fwms%2Fbd86bcc0-f318-402b-a145-015f85b9427e&datasetId=S2L2A&fromTime=2021-11-28T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2021-11-28T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR, letzter Zugriff 21.01.2022.
- UN-SPIDER, o.J.: Step by Step: Recommended Practice Flood Mapping. <https://www.unspider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-flood-mapping/step-by-step>, letzter Zugriff 26.11.2022.
- WANG, W., WEICAI, Y., TANDONG, GAO, Y., XIAOXIN, Y. & KATTEL, D., 2011: A First-order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, **31**(2), 122-130, <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00059.1>.
- WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2009: The Cost of Climate Change. The Story of Thorthormi Lake in Bhutan. https://wwf.fi/app/uploads/h/5/7/5rqxrm5dl5ejasicpp5m4zc/the_cost_of_climate_change.pdf, letzter Zugriff 27.11.2022.
- YAO, X., LIU, S., SUN, M., WEI, J. & GUO, W., 2012: Volume calculation and analysis of the changes in moraine-dammed lakes in the north Himalaya: a case study of Longbasaba lake. *Journal of Glaciology*, **58**(210), 753-760, <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J048>.