



Zweitmeinung Sekundär- und Tertiärprozesse, Szenarien und Wirkungsbereiche "Öschibach/Kander", Kandersteg BE

Birmensdorf, 28. Mai 2021

Christoph Graf, Dieter Rickenmann

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL



Impressum

Projektbearbeitung

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Gruppe Wildbäche und Massenbewegungen

Dr. Dieter Rickenmann, Senior Scientist
dieter.rickenmann@wsl.ch
+41 44 739 24 29

Christoph Graf, Technischer Mitarbeiter
christoph.graf@wsl.ch
+41 44 739 24 54

Qualitätssicherung und Review

Dr. Alexandre Badoux, Gruppenleiter
alexandre.badoux@wsl.ch
+41 44 739 22 83

Auftraggeberin

Schwellenkorporation Kandersteg
Anton Röstli, Präsident
schwellenpraesi@bluewin.ch

Präambel / Disclaimer

Obwohl die WSL mit aller Sorgfalt auf die Richtigkeit der veröffentlichten Informationen achten, kann hinsichtlich der inhaltlichen Richtigkeit, Genauigkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit dieser Informationen keine Gewährleistung übernommen werden. Haftungsansprüche gegen die WSL wegen Schäden materieller oder immaterieller Art werden daher ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Literaturverzeichnis.....	v
1 Zusammenfassung.....	1
2 Ausgangslage und Zielsetzung.....	3
2.1 Auftrag.....	3
2.2 Verwendete Grundlagen und Literatur.....	5
3 Generelle Beurteilung / Einschätzung.....	6
4 Ergänzende Angaben und Unterlagen.....	8
4.1 Kaskadenprozesse, Forschungsaktivitäten und einige aktuelle weltweite Beispiele.....	8
4.2 Beispiel Pizzo Cengalo / Bondo.....	11
4.3 Modellierung und Reichweite von Murgängen (und Bergstürzen).....	15
4.4 Oeschinensee / Seepegelschwankung, Niederschlag, Abfluss.....	17
5 Sturzablagerung und deren Mobilisierung als Murgänge.....	20
5.1 Primärprozesse Sturz und Betrachtung möglicher Reichweiten.....	21
5.2 Ablagerungsverhalten und Interaktion mit Oeschinensee.....	23
5.3 Untersuchte Szenarien.....	24
5.4 Bewertung der Wahrscheinlichkeiten.....	24
5.5 Empfehlung für weiterführende Arbeiten.....	26
6 Sekundärprozesse im Öschibach.....	28
6.1 Geländeinterpretation und Primärprozess.....	28
6.2 Hydrologie (Abflussschätzungen / Seeausbruch).....	29
6.3 Untersuchte Szenarien.....	30
6.4 Murgangentstehung und weitere Feststoffmobilisierung (Erosion entlang des Fließweges).....	32
6.5 Abschätzungen wichtiger Fließparameter mit empirischen Faustformeln.....	33
6.6 Fließ- und Ablagerungsverhalten (Szenarien und Modellierung).....	34
6.7 Bewertung der Wahrscheinlichkeiten.....	37
6.8 Empfehlungen zu Massnahmen.....	38

7	Tertiärprozesse in der Kander	41
7.1	Situation nach Sekundärprozessen.....	41
7.2	Hydrologie.....	41
7.3	Geschiebemobilisierung und -einträge.....	42
7.4	Aktuelle Hochwassersicherheit der Kander.....	43
7.5	Geschiebeeinträge vom Öschibach in die Kander für verschiedene Szenarienkombinationen.....	44
7.6	Geschiebmodellierung Kander für verschiedene Szenarienkombinationen	45
7.7	Wirkungsräume Tertiärprozesse.....	46
7.8	Beurteilung der berechneten Sedimentfrachten.....	47
7.9	Schutzmassnahmen Tertiärprozesse	48
7.10	Empfehlung für weiterführende Arbeiten	49
8	Nachvollziehbarkeit und Dokumentation	50
8.1	Struktur der beiden Berichte	50
8.2	Beurteilung der formalen Aspekte in den beiden Berichten	50
9	Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen unter Berücksichtigung der realisierten und geplanten Massnahmen...	52
	Abbildungsverzeichnis.....	56
	Tabellenverzeichnis.....	57

Literaturverzeichnis

Technische Berichte:

Abteilung Naturgefahren (2019): «Spitze Stei» - Grundlagen Szenarien HWS Oeschibach. Präsentation vom 14.8.2019

Abteilung Naturgefahren (2020): «Spitze Stei» Kandersteg. Einflussfaktoren auf Bewegungsraten 2020. Bericht vom 25.11.2020

CSD Ingenieure AG und WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (2020): Zweitmeinung zu geologischem Modell, Szenarien und Wirkungsbereiche «Spitze Stei», Kandersteg, Bern. Bericht vom 10.3.2020 im Auftrag der Einwohnergemeinde Kandersteg und des Amtes für Wald und Naturgefahren des Kantons Bern

Emch+Berger (2018): Ereignisdokumentation Öschibach. Hochwasser 01. August 2018. Bericht vom 2.11.2018 im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren des Kantons Bern

GEOTEST AG (2016): Kandersteg, Revision Gefahrenkarte. Technischer Bericht Nr. Nr. 1415008.1 zur Gefahrenkarte im Auftrag der Einwohnergemeinde Kandersteg und des Oberingenieurkreis I, KAWA, Abt. Naturgefahren vom 10.11.2016

GEOTEST AG (2019): Kandersteg, Spitze Stei. Expertenbericht Phase A und B. Bericht Nr. 1418139.1 vom 8.4.2019 im Auftrag der Einwohnergemeinde Kandersteg vom 8.4.2019

GEOTEST AG (2020): Kandersteg»Spitze Stei«, Auswertung historische Orthophotos. Kurzbericht Nr. 1418139.11 vom 11.9.2020 im Auftrag der Einwohnergemeinde Kandersteg

Hunziker, Zarn & Partner AG (2019): Geschiebestudie Öschibach. Bericht vom 4.11.2019 im Auftrag der Schwellenkorporation Kandersteg

Hunziker, Zarn & Partner AG (2020): Spitze Stei – Tertiärprozesse: Auswirkungen auf die Kander in Kandersteg. Bericht vom 31.8.2020 im Auftrag der Schwellenkorporation Kandersteg

NDR Consulting GmbH und Hunziker Gefahrenmanagement (2020): Spitze Stei – Sekundärprozesse. Faktenblätter und Erläuterungen. Bericht vom 5.6.2020 im Auftrag der Schwellenkorporation Kandersteg

Wissenschaftliche Publikationen:

Aaron, J., McDougall, S. (2019): Rock avalanche mobility: the role of path material. Eng. Geol., 257

BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eau – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque, Nr. 4 – Bern 2003. M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser mit weiteren Beitragenden

- Demmel, S. (2019): Water Balance in Val Bondasca. Initial hydrological conditions for debris flows triggered by the 2017 rock avalanche at Pizzo Cengalo. Master Thesis, May 2019. ETHZ-IfU, WSL, SLF
- Einstein, H. A. (1950): The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow. United States Department of Agriculture, Washington, D.C., Technical Bulletin No. 1026, p. 25.
- Evans, S.G., Bishop, N.F., Smoll, L.F., Valderrama Murillo, P., Delaney, K.B., Smith, A.O. (2009): A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970, Engineering Geology, Volume 108, Issues 1–2, Pages 96-118.
- Frick, E., Kienholz, H., Romang, H. (2011): SEDEX (SEDiments and EXPerts). P42 Geographica Bernensia. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Gabbi, J., Tognacca, C., Keiser, M. (2019): Gravitative Prozesse in der Bondasca – von der Gefahrenbeurteilung zur Umsetzung der Schutzmassnahmen. Wasser, Energie, Luft. 2/2019: 74 - 84.
- Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen – Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Köpfli, P., Grämiger, L. M., Moore, J. R., Vockenhuber, C., Ivy-Ochs, S. (2018): The Oeschinensee rock avalanche, Bernese Alps, Switzerland: a co-seismic failure 2300 years ago? Swiss Journal of Geosciences, 111(1-2), 205-219.
- Malcherek (undatiert, Univ. München): Sedimenttransport und Morphodynamik, Andreas Malcherek, Universität München.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G. (1992): Prediction of debris flow peak discharge. Proc. International Symposium Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, pp. 99–108.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., McArdell, B.W. (2006): Comparison of flow resistance relations for debris flows using a onedimensional finite element simulation model. Nat Hazards Earth Syst Sci 6:155–165
- Raymond Pralong, M., Rickenmann, D., Schneider, T. (2018): Vergleich dreier numerischer Simulationsmodelle für Murgänge: Anwendung auf Wildbachkegel im Kanton Wallis. Wasser, Energie, Luft, 110, 1: 43-52.
- Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. J. Hydraul. Eng., 117(11), 1419–1439.
- Rickenmann, D. (2014): Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL Berichte, 9. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 105 p.
- Rickenmann, D. (2021): Modellierung und Reichweite von Murgängen (und Bergstürzen): ein kurzes review. Birmensdorf. Unveröff.
- Rickenmann, D., Badoux, A. (2018). Gefahrenbeurteilungen von Wildbächen in der Schweiz – quo vadis? Standortbestimmung und kurzer Ausblick. Agenda FAN 1/2018, pp. 25-30.
- Scheidl, C., Rickenmann, D. (2010): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. Earth Surface Processes and Landforms, 35, 2: 157-173. doi: 10.1002/esp.1897
- Singeisen, C., Ivy-Ochs, S., Wolter, A., Steinemann, O., Akçar, N., Yesilyurt, S., Vockenhuber, C. (2020): The Kandersteg rock avalanche (Switzerland): integrated analysis of a late Holocene catastrophic event. Landslides

- Staron, L., Lajeunesse, E. (2009): Understanding how volume affects the mobility of dry debris flows. *Geophys. Res. Lett.* 36, L12402.
- Tognacca, C., Gabbi, J., Cattaneo, G., Beffa C. (2019): Gravitative Prozesse in der Bondasca. *Wasser, Energie, Luft.* 4/2019.: 235 - 242.
- Turowski, J.M., Rickenmann, D., Dadson, S.J. (2010): The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology*, 57: 1126-1146, doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.0140.x
- Walter F, Amann F, Kos A, Kenner R, Phillips M, de Preux A, Huss M, Tognacca C, Clinton J, Diehl T, Bonanomi Y (2020) Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology* 351:106933

Weitere Unterlagen:

- DSM (2020): Karten Simulationen und Excel-Sheet Inputparameter - Murgangmodellierung mit Flow-R vom 24.3.2021
- DSM (2020): Karten Simulationen und Excel-Sheet Inputparameter – Murgangmodellierung mit Flow-2D vom 24.3.2021
- DTM und Orthophoto 2020
- Emch+Berger AG (2020): Pläne Notmassnahmen Spitze Stei - GAP vom 9.9.2020
- Emch+Berger AG (2020): Pläne Notmassnahmen Spitze Stei - Dämme Öschwald und Zilfuri vom 3.7./15.7/25.8.2020
- Emch+Berger AG (2021): Memo Pläne Schutzmassnahmen Spitze Stei vom 2.3.2021 mit Erläuterungen zum Ausbaustand Dezember 2020
- GEOTEST AG (2020): Aktennotiz Begehung Oeschibach 17.08.2020
- GEOTEST AG (2020): Aktennotiz Spitze Stei – Szenarien Sturz vom 20.4.2020
- Licht- und Wasserwerk AG Kandersteg - LKW (2021): Messdaten Oeschinensee 2012 - 2020
- SLF (2021): Daten Flüssigniederschlag 2011 – 2020 der IMIS-Schneestation «Fisi 2155 m»
- WSL (2021): Fotos Begehung vom 24.3.2021

1 Zusammenfassung

Nachfolgend ist in Tabelle 1 eine Zusammenfassung der Befunde und der Empfehlungen sowie die Priorisierung der zu behandelnden Themen zusammengestellt.

Insgesamt halten wir fest, dass zum Zeitpunkt unserer Beurteilung die Situation bezüglich Murgänge als wichtiger und dringlicher betrachtet werden muss, als die Auswirkungen von Fließprozessen in der Kander.

Anmerkung: Die unter 1a, 1b, 1c, 1d enthaltenen Empfehlungen in Tabelle 1 beziehen sich auf die Situation mit den aktuell realisierten und geplanten Schutzmassnahmen, d.h. auf einen Zeitpunkt nach der Erstellung der in den beurteilten Berichten (NDR/Hunziker 2020 und HZP 2020) vorgeschlagenen Massnahmen.

Tabelle 1: Prioritäten der Befunde und der Empfehlungen in der Zweitmeinung.

Priorität	Thema	Empfehlung	Kap.
1a	Detaillierte Modellierung von Murgangablagerungen <u>innerhalb</u> des Geschiebeablageplatzes (GAP)	Eingrenzung/Überprüfung des erwartbaren Ablagerungsvolumens im GAP, für verschiedene Annahmen bzgl. Anzahl Schübe und Materialeigenschaften (granular/schlammstromartig); daraus ergeben sich allenfalls Empfehlungen für Geländeanpassungen im GAP zwecks optimaler Ausnutzung bzw. Bewirtschaftung des Raumes (insbesondere der Südseite) und für die Festlegung der Überfallhöhe des Abschlussbauwerks.	3, 6.6 , 6.8, 6.9, 9
1b	Abschlussbauwerk GAP	(Definitive) Gestaltung des Abschlussbauwerkes der beiden Dämme planen/festlegen (unter Berücksichtigung von Priorität 1a).	6.3 , 6.6, 9
1c	Detaillierte Modellierung von Murgangablagerungen <u>ausserhalb</u> des GAP	Genauere Bestimmung/Überprüfung der möglichen Ablagerungsräume ausserhalb des Sammlers (bei dessen Überlastung), für Szenarien F1, F2, E3, B, A1-A4. Eine detailliertere Bestimmung möglicher Ablagerungsräume erhöht die Plausibilität bzw. Genauigkeit der Beurteilung der Wirkungsräume und Gefährdungsgebiete (für Planungszonen).	3, 6.6 , 6.7, 6.8; 7.5, 7.6, 9
1d	Szenario «nasser Schuttstrom erreicht Kander»	Wahrscheinlichkeit des Szenarios überprüfen sowie mögliche Ablagerungsräume überprüfen.	3, (4.2), 6.3 , (6.5), 6.6 , 6.7, (6.8), 7.1, 7.5 , 7.6, 7.7, 9

2	Abschätzung der Bandbreite und Darstellung der Unsicherheiten bzgl. der Geschiebemodellierung in der Kander	Unsicherheiten quantifizieren und berücksichtigen sowie im Bericht angeben.	7.3, 7.6, 7.7, 9
3a	Abschätzung bzw. Darstellung der Bandbreite der Unsicherheiten bzgl. der fluvialen Geschiebemobilisierung im Öschibach sowie der Einträge aus dem Öschibach in die Kander	Darstellung der Unsicherheiten; Berücksichtigung bzgl. mögl. Weitertransport von Geschiebe durch die Kander, dies im Bericht angeben.	7.2, 7.3, 7.5
3b	Schwebstofftransport und «hyperconcentrated flow», Geschiebeeintrag aus dem Öschibach und Transport in der Kander	Quantifizierung und Darstellung der Unsicherheiten, Berücksichtigung bzgl. möglichem Weitertransport von Material durch die Kander, dies im Bericht angeben.	7.3, 7.4, 7.6
4	Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Überlegungen und Berechnungen	Annahmen und Eingangsgrößen für Berechnungen und Modellierungen angeben und begründen (z.B. (i) welche Schätzformel für den Maximalabfluss eines Murgangschubes verwendet wurde bzw. welcher Vorfaktor dafür verwendet wurde inkl. Begründung für die Wahl; (ii) weshalb für eine Gesamtfracht für ein Szenario wie viel und wie gross Schübe gewählt wurden; (iii) warum welche Reibungsparameter bei verschiedenen Modellen gewählt wurden).	8, div. Kap.

Kapitelangaben weisen in fett hervorgehoben aus, wo die entsprechenden Informationen im Bericht hauptsächlich zu finden sind.

2 Ausgangslage und Zielsetzung

Die technischen Berichte zu den Sekundär- und Tertiärprozessen, welche mit der vorliegenden Zweitmeinung geprüft werden, wurden vor rund einem Jahr erstellt. In der Zwischenzeit erfolgten weitere Beurteilungen und bauliche wie organisatorische Massnahmen wurden umgesetzt oder sind in Umsetzung begriffen. Obwohl die vorliegende Zweitmeinung in erster Linie den Stand vom Juni resp. August 2020 beurteilt, wurden jüngere Entwicklungen und Befunde nach Möglichkeit mitberücksichtigt.

Wir haben uns für das Verfassen der Zweitmeinung in erster Linie auf bestehende Unterlagen abgestützt und keine eigenen Feldaufnahmen oder numerische Modellierungen gemacht. Vereinzelt wurden weitere, in den Unterlagen nicht vorhandene Daten verwendet und Vergleichsberechnungen angestellt oder Abschätzungen vorgenommen. Anlässlich einer Begehung am 24.3.2021 haben wir den aktuellen Zustand im Gebiet besichtigt.

Unser Vorgehen hat sich an der bestehenden Zweitmeinung zum Primärprozess von CSD/SLF (2020) orientiert. Der vorliegende Bericht ist daher in ähnlicher Weise verfasst und strukturiert. Wir sind gemäss den folgenden Punkten vorgegangen:

1. Sichtung Berichte
2. Sichtung Zusatzberichte
3. Suche und Studium weiterführende Literatur
4. Begehung mit dem Auftraggeber und der Projektleitung
5. Rückfragen und Treffen mit den Verfassern der Erststudien und dem Auftraggeber (Gespräche)
6. Präsentation Ergebnisse Zweitmeinung
7. Abgabe Bericht Zweitmeinung

2.1 Auftrag

Die Schwellenkorporation Kandersteg hat die WSL am 13. Januar 2021 mit der Anfrage für das Verfassen einer Zweitmeinung zu den Sekundärprozessen im Öschibach kontaktiert und am 15. Februar 2021 den entsprechenden Auftrag vergeben. Ab Anfang März standen uns die angeforderten Unterlagen zur Verfügung.

Objekt: Murgänge und Geschiebetransport im Öschibach und der Kander in der Gemeinde Kandersteg (vgl. Abbildung 1)

Auftraggeber: Schwellenkorporation Kandersteg

Auftrag: Verfassen einer Zweitmeinung zu den Sekundär- und Tertiärprozessen, Szenarien und Wirkungsbereiche im Öschibach und der Kander in Kandersteg BE

Die Gefährdung ausgehend vom Spitze Stei (Primärprozesse) und potentiellen Folgeprozessen im Öschibach und in der Kander (Sekundär- und Tertiärprozesse) ist gemäss der Gefahrenbeurteilung der bisher involvierten Fachspezialisten sehr kritisch. Die aktuelle Gefährdung ist durch die beste-

hende Gefahrenkarte der Gemeinde Kandersteg (Gesamtrevision von 2016) nicht abgedeckt. Gemäss jüngster Gefahrenbeurteilung betrifft das Wirkungsgebiet der möglichen Prozessketten einen grossen Teil des Dorfes Kandersteg. Die Auswirkungen von Ereignissen (in verschiedenen Szenarien) werden darin für das besiedelte Gebiet und etliche weitere Bereiche der Gemeinde Kandersteg als gravierend beschrieben. Aus diesem Grunde sind zwischenzeitlich bereits umfangreiche Vorkehrungen getroffen worden (wasserbauliche Sofortmassnahmen, organisatorische Massnahmen).

Die wasserbaupflichtige Schwellenkorporation Kandersteg wünscht, wie bei den Primärprozessen (Sturz), zur Absicherung der bisher involvierten Fachspezialisten sowie zu ihrer eigenen Sicherheit eine Zweitmeinung zu den Sekundär- und Tertiärprozessen (Wasserprozesse) einzuholen. Eine solche wird durch das Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I (OIK I) und das Bundesamt für Umwelt, Abteilung Gefahrenprävention, Sektion Hochwasserschutz (BAFU) zwar nicht gefordert, jedoch (finanziell) unterstützt und fachlich begleitet.

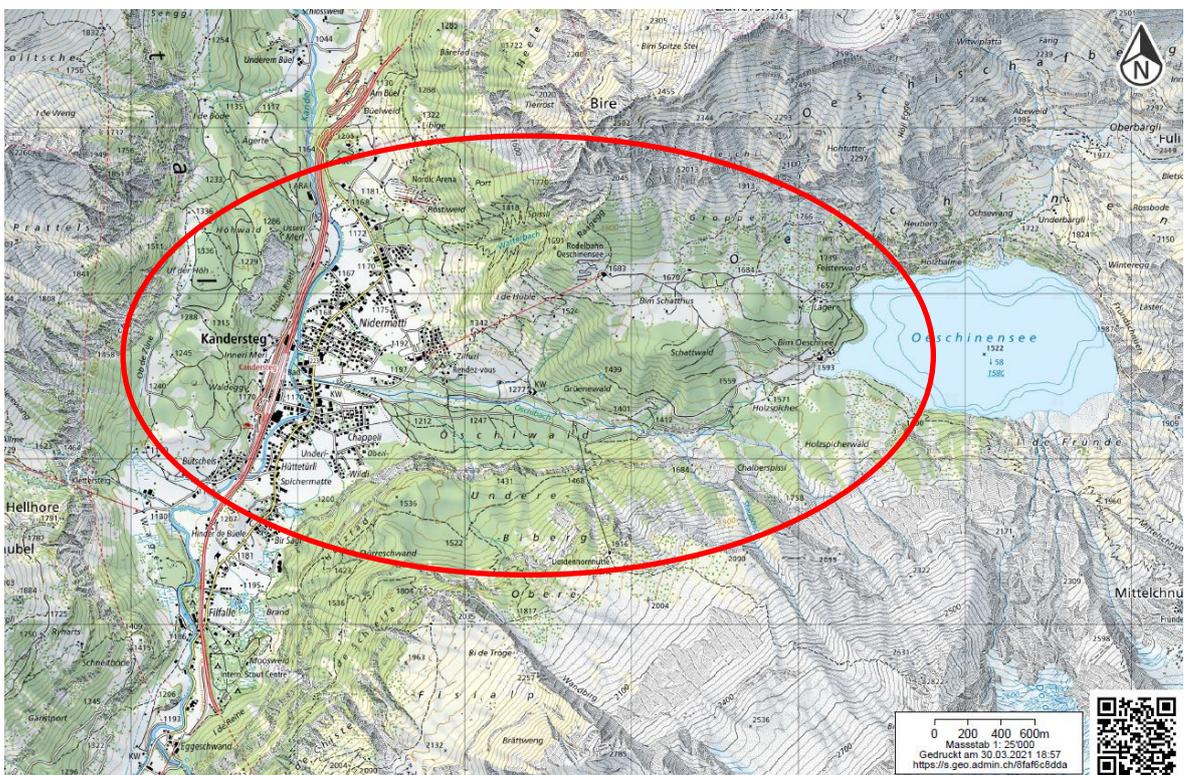


Abbildung 1: Übersichtskarte mit Angabe des Betrachtungsperimeters Öschibach und Kander in Kandersteg unterhalb der Hanginstabilität «Spitze Stei»

Die Zweitmeinung soll die folgenden Punkte erfüllen:

- Plausibilisierung der Gefahrenbeurteilung von 2020 durch eine unabhängige Organisation
- Prüfung der vorhandenen Berichte auf (a) Vollständigkeit, (b) Nachvollziehbarkeit und (c) Plausibilität

Die Zielsetzungen der Zweitmeinung sind:

1. Untersuchung und Bewertung der (a) Inhalte, (b) Vorgehensweisen, (c) Schlussfolgerungen in den vorhandenen Berichten
2. Ausdrückliche Beachtung von (a) Hydrologie, (b) Mobilisierung und Transport von Feststoffen, (c) Szenarien, (d) Art, Eintretenswahrscheinlichkeit und Ablauf (zeitlich und räumlich) der Prozesse (insbesondere auch potentieller Ablagerungsräume), (e) Berücksichtigung der baulichen (Sofort-)Massnahmen, (f) Wirkungsflächen und Abgrenzungen, (g) Handlungsempfehlungen und (h) Gefährdungsgebieten (für Planungszonen)

Im Rahmen der Zweitmeinung sollen weder Feldaufnahmen noch Modellierungen notwendig sein. Eine Begehung mit Besichtigung des aktuellen Zustandes wird jedoch gewünscht.

2.2 Verwendete Grundlagen und Literatur

Der Auftraggeber hat dem Auftragnehmer für die Erarbeitung der Zweitmeinung die techn. Berichte inkl. Anhänge sowie Aktennotizen und Sitzungsprotokolle zu den Sekundär- und Tertiärprozessen und die zugehörigen Karten und Pläne zur Verfügung gestellt.

Die Einwohnergemeinde Kandersteg betreibt eine Politik der offenen Kommunikation und stellt alle relevanten Unterlagen auf ihrer Webseite öffentlich zur Verfügung. Neben technischen Fachberichten gilt dies auch für die Dokumentation zu Veranstaltungen und Präsentationen, insbesondere für diejenigen, welche während den Einschränkungen in der Covid-19-Pandemiezeit per Videoübertragung stattgefunden haben.

Weiterführende Literatur sowie die in den Berichten genannten Literaturquellen standen uns ebenfalls zur Verfügung oder wurden von uns zusätzlich beigezogen. Sämtliche für die vorliegende Zweitmeinung verwendeten Unterlagen sind in einem separaten Literaturverzeichnis am Anfang des Dokuments aufgeführt.

Die vom Auftragnehmer konsultierten Berichte stellen im Wesentlichen den Stand des Wissens im Sommer 2020 dar. Seither realisierte Anpassungen und insbesondere bauliche Veränderungen sind darin nicht dokumentiert und betrachtet.

3 Generelle Beurteilung / Einschätzung

An dieser Stelle fassen wir unsere wichtigsten Einschätzungen bezüglich der Resultate und der Vollständigkeit der Originalberichte kurz zusammen. Wir beziehen uns auf den Wissens- und Planungsstand zur Zeit der Erstellung dieser Berichte durch die Erstbearbeiter und machen ergänzend einige Bemerkungen bezüglich der Nachvollziehbarkeit der in den Originalberichten präsentierten Ergebnisse.

Wir möchten an dieser Stelle auch generell darauf hinweisen, dass die Resultate bei Gefahrenbeurteilungen von Wildbachprozessen (und z.T. auch des fluvialen Geschiebetransportes in steilen Gerinnen) teilweise vom bearbeitenden Büro (verwendete Modelle, Annahmen, Erfahrungswerte) abhängen. Dies hängt damit zusammen, dass es bezüglich der vorhandenen Methoden sowie deren Anwendungsbereich und -grenzen eine beträchtliche Unsicherheit gibt. Zudem fehlen von Seite der angewandten Forschung weitgehend entsprechende Untersuchungen, welche z.B. aufgrund eines umfassenderen, systematischen Vergleichs verschiedener Ansätze Empfehlungen zur Wahl und zum Anwendungsbereich der Methoden geben könnten.

Wir stimmen im Wesentlichen mit der generellen Einschätzung der Erstbearbeiter bzgl. der Sekundärprozesse und der Tertiärprozesse im Betrachtungsperimeter überein. Trotz des Zeitdruckes bei der Erstellung der Berichte scheinen uns die gewählten Szenarien und die abgeschätzten Auswirkungen plausibel.

Beim Bericht zu den Sekundärprozessen sehen wir vor allem folgende Erweiterungen und Präzisierungen der Untersuchungen als sinnvoll an:

- (i) Die im Bericht zu den Sekundärprozessen angenommenen Szenarien und die dazu abgeschätzten Eintretenswahrscheinlichkeiten erachten wir als plausibel. Eine Ausnahme ist dabei das Szenario Schuttstrom, wo wir zu einer anderen Einschätzung gelangen: nach unseren Abschätzungen kann auch ein Schuttstrom in der Grössenordnung von 300'000 m³ Murgangvolumen die Kanderemündung erreichen.
- (ii) Was die Modellierung und Abschätzung der Reichweite und des Ablagerungsverhaltens von Murgängen verschiedener Grösse (Volumen, Maximalabfluss, Anzahl Schübe) betrifft, sind die im Bericht enthaltenen Angaben nicht immer klar nachvollziehbar. Sowohl im Hauptbericht als auch in den zusätzlich zur Verfügung gestellten Unterlagen geht oft nicht hervor, weshalb für ein bestimmtes Szenario Murgänge einer bestimmten Grösse modelliert wurden. Insbesondere fehlt eine Begründung, weshalb wichtige Reibungsparameter (die stark den Ablagerungsort beeinflussen) gerade so und nicht anders gewählt wurden. Zudem fehlen Angaben zu einem möglichen Unsicherheitsbereich der Modellierungsergebnisse.
- (iii) Falls zum Zeitpunkt der Bearbeitung keine (weiteren) Schutzmassnahmen geplant gewesen wären, wären unseres Erachtens weitere, detailliertere numerische Modellierungen zum Fliess- und Ablagerungsverhalten notwendig gewesen. Dies unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen bzgl. Reibungsverhalten (Mobilität), Maximalabfluss, Anzahl Schübe sowie Anpassung der Topographie nach Ablagerungen. Damit hätten möglichen Unsicherheitsbereiche illustriert bzw. quantifiziert werden können. Da inzwischen Schutzmassnahmen realisiert wurden bzw. in Planung sind, erübrigen sich solche Modellierungen für den Zustand ohne Massnahmen. Die Empfehlungen für weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der inzwischen genau bekannten Schutzmassnahmen sind in Kap. 9 aufgeführt.

Beim Bericht zu den Tertiärprozessen sehen wir vor allem folgende Erweiterungen und Präzisierungen der Untersuchungen als sinnvoll an:

- (i) Unsicherheiten bei den Modellierungen mit dem Modell Mormo sollten abgeschätzt bzw. quantifiziert werden. Die Berechnungen mit dem Modell Mormo wurden mittels Simulationen von Normaljahren «plausibilisiert», was sehr unsicher ist da gerade in Normaljahren wenig Geschiebetransport stattfindet.
- (ii) Die Unsicherheiten der Geschiebetransportmodellierungen in der Kander sollten abgeschätzt werden.
- (iii) Die Auswirkungen eines Szenarios «Schuttstrom bis in die Kander» sollten näher untersucht werden. (vgl. Punkt (i) oben zu den Sekundärprozessen)
- (iv) Unsicherheiten bei den Berechnungen möglicher Geschiebeeinträge vom Öschibach in die Kander sollten angegeben werden. Zudem könnten auch die Unsicherheiten bezüglich Einfluss des Feinmaterials auf «hyperconcentrated flows» bzw. auf Schwebstofftransport genauer untersucht werden.

Grundsätzlich finden wir, dass die Nachvollziehbarkeit (Transparenz) der in den Berichten der Erstbearbeiter verwendeten Methoden und Annahmen bzw. gewählter Eingabeparameter verbessert werden könnte. Dies betrifft in vermehrtem Masse den Bericht zu den Sekundärprozessen, da im Bereich der Beurteilung der Wildbachprozesse die Unsicherheiten vergleichsweise gross sind, und etwas weniger ausgeprägt den Bericht zu den Tertiärprozessen, da in diesem Themenbereich eher Standardmethoden zur Anwendung gelangen.

Uns scheint, dass in so einer komplexen Fragestellung die Abstimmung zwischen den Bearbeitenden der Primär-, Sekundär- und Tertiärprozessen eminent wichtig ist und noch nicht in optimaler Form stattgefunden hat.

4 Ergänzende Angaben und Unterlagen

Neben dem Studium der zur Verfügung gestellten Berichte zu den Sekundär- und Tertiärprozessen (vgl. Kap. 2.2) wurden für das Verfassen der Zweitmeinung zusätzliche Grundlagen und Informationen berücksichtigt. Seit dem Verfassen der Berichte zu den Sekundär- und Tertiärprozessen sind mehrere Monate vergangen. In dieser Zeit wurden weitere Erkenntnisse gewonnen und insbesondere bauliche Massnahmen vorangetrieben, ohne dass entsprechende weiterführende Studien vorgenommen wurden.

Weitere Unterlagen, Fallbeispiele, Aspekte, die in den beiden Berichten nicht vorkommen und für den Fall relevant erscheinen wurden verwendet und soweit möglich beschrieben.

Die Abklärungen konzentrierten sich insbesondere auf:

- Prozessarten und Prozessablauf (Kap. 4.1),
- Kaskadenprozesse (Kap. 4.1)

Im Vordergrund der Anlehungs- und Vergleichsbeispiele stehen primär Lokalitäten in der Schweiz und allgemein der Alpen. Hinweise auf Forschungsaktivitäten u.a. an der WSL wurden integriert (Kap. 4.1), um auf künftige Forschungsprojekte hinzuweisen. Ebenso nennen wir Informationsquellen über weltweit stattfindenden Massenbewegungsprozesse (vgl. Kap. 4.1.)

Aufgrund der Aktualität und gewissen Parallelen werden die Ereignisse in Bondo mit dem Bergsturz von 2017 und den nachfolgenden Murgang- und Gerinneereignissen und diesbezügliche Untersuchungen relativ ausführlich zusammengefasst. Es wurde sowohl auf publizierte Artikel wie auch auf Forschungsarbeiten zurückgegriffen (vgl. Kap. 0).

Weil generell die Gefahrenbeurteilung von Wildbächen nach wie vor mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, ist hier die Zusammenfassung eines kurzen Reviews bezüglich Reichweiten von Murgängen wiedergegeben (vgl. Kap. 4.3).

Zusätzlich haben wir einige Angaben zur Hydrologie und zum Oeschinensee zusammengetragen und kurz diskutiert (vgl. Kap. 4.4):

- Daten Oeschinensee (und Abfluss) normierte Seespiegelentwicklung über das Jahr
- Niederschlagsdaten umliegender hochgelegener Messstationen als Grundlage für Effekt auf Seepegelentwicklung

4.1 Kaskadenprozesse, Forschungsaktivitäten und einige aktuelle weltweite Beispiele

Mit einer Kaskade werden verschiedenartige Prozessarten bezeichnet, welche nacheinander auftreten und in Abhängigkeit zueinander stehen. Schaukelt sich der Gesamtprozess über die verschiedenen Kaskaden auf und verstärkt sich dabei, spricht man auch von einem Lawineneffekt. Der Kaskade gegenüber steht der Dominoeffekt, wo meist ähnliche Ereignisse aufeinander folgen und jedes einzelne zugleich auch Ursache des folgenden ist. Sie alle gehen auf ein einzelnes Anfangsereignis zurück. Ein Spezialfall des Dominoeffekts stellt die Kettenreaktion dar, welche eine physikalische oder chemische Umwandlung darstellt, bestehend aus gleichartigen, einander bedingenden Reaktionen, die linear oder verzweigt ablaufen. Am Anfang steht in der Regel ein Auslöser oder Trigger, welcher die Prozesskette oder Kaskade anstösst. Als Prozessketten bezeichnet man Massenbewegungen, in denen zum Beispiel durch die Aufnahme von Wasser, Schnee oder Eis, ein Übergang

zwischen verschiedenen Prozessen stattfindet. In Kandersteg sind in einer Kaskade oder Prozesskette Sturz- und Fließprozesse, die aufeinander aufbauen und sich je nach Szenario verstärken können vorhanden.

Das CERC (Climate Change, Extremes, and Natural Hazards in Alpine Regions Research Center) ist ein Forschungszentrum für Klimawandel, Extremereignisse und Naturgefahren im alpinen Raum. Es wird vom Kanton Graubünden und der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL getragen und von der ETH Zürich unterstützt. Das Forschungszentrum untersucht sechs Forschungsschwerpunkte, von denen einige für den Fall Kandersteg von grosser Bedeutung sind:

Schwerpunkt 1) Wetter- und Klimaextreme im Alpenraum

Wetter- und Klimaextreme im Alpenraum nehmen mit fortschreitender globaler Erwärmung zu. Die Intensivierung von Extremwetterereignissen ist einer der folgenreichsten Aspekte des Klimawandels. Diese haben das Potenzial im Alpenraum soziale und wirtschaftliche Krisen auszulösen, u.a. durch eine Erhöhung der Häufigkeit und der Auswirkungen von Naturgefahren oder durch den Verlust von bislang verfügbaren Ökosystemleistungen. Das Zentrum trägt mit seiner Forschung dazu bei, Auswirkungen dieser Extreme und damit verbundene Risiken besser zu verstehen und Lösungen zu finden, wie diese zum Nutzen der Gesellschaft gemildert oder bewältigt werden können. In Kandersteg sind Wetter- und Klimaextreme zum einen als vorbereitender, zum anderen als auslösender Aspekt von grösster Wichtigkeit und wirken sich entsprechend auf Primär-, Sekundär- und Tertiärprozesse sowie weitere mögliche Folgen aus.

Schwerpunkt 2) Permafrost

Der Permafrost prägt unsere Gebirgslandschaft und spielt eine wichtige Rolle für u.a. die Planung und den Bau von Hochgebirgsinfrastrukturen, für die lokale Trinkwasserversorgung und für das Naturgefahrenmanagement. Taut der ständig gefrorene Boden auf, drohen Naturgefahren wie Steinschlag oder Murgänge. Mit seiner Forschung in Permafrostgebieten erarbeitet das Zentrum wichtige Grundlagen zum thermischen Zustand der Permafrostböden und deren Dynamik. Das Ziel ist es, Prozesse besser zu verstehen, zukünftige Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und Risiken und Gefahren vorzubeugen. In Kandersteg spielt dieser Aspekt primär für die Primärprozesse eine zentrale Rolle.

Schwerpunkt 4) Alpine Massenbewegungen

Um die Folgen des Klimawandels auf Bewegungs- und Ablagerungsprozesse von Lawinen, Hangrutschungen, Murgängen und Steinschlag abschätzen zu können, ist es unabdingbar, eine breite Palette an Szenarien zu berücksichtigen, auch solche für die es noch kaum Referenzfälle gibt. Somit kommt der Simulation der Dynamik von solchen alpinen Massenbewegungen eine zentrale Bedeutung zu. Sie bildet in Zeiten unvorhersehbarer Veränderungen die Grundlage für die Gefahrenbeurteilung und die Planung von Schutzmassnahmen. Das Zentrum erforscht in Feld- und Laborexperimenten die Entstehungs-, Bewegungs- und Ablagerungsprozesse von Lawinen, Hangrutschungen, Murgängen und Steinschlag und bildet diese mit physikalischen Modellen ab. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Verkettung von Gefahrenprozessen. Damit unterstützt es ein risikobasiertes, nachhaltiges Management von Naturgefahren. In Kandersteg stehen diese Aspekte mit all ihren Herausforderungen bereits in der praktischen Umsetzung.

Schwerpunkt 6) Risikomanagement, Risikokommunikation und Resilienz

Gebirgsräume in der Schweiz sind durch Naturgefahrenprozesse wie z.B. Hochwasser, Lawinen, Murgängen, Rutschungen oder Steinschlag bedroht. Ein wirkungsvoller und effizienter Umgang mit diesen Gefahren ist für das nachhaltige Bestehen einer Gesellschaft in Gebirgsräumen von grundlegender Bedeutung. Zur Bewältigung der Gefahren und Risiken und zur Erhöhung der Resilienz der Gesellschaft sind Massnahmen in der Prävention, in der Intervention und in der Wiederherstellung notwendig. Bei seltenen Extremereignissen stossen die klassischen Ansätze aus dem Naturgefahr-

renmanagement allerdings an ihre Grenzen und insbesondere die Risikokommunikation wird zu einer grossen Herausforderung. Das Zentrum fördert mit seiner Forschung eine den gesellschaftlichen und klimatischen Veränderungen angepasste Risikokultur. In Kandersteg ist das drohende Extremereignis bereits Tatsache und damit eine grosse Herausforderung für das Naturgefahrenmanagement und die Risikokommunikation.

Das WSL Forschungsprogramm CCAMM - Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements – wurde im Januar 2018 ins Leben gerufen. Es bündelt das Wissen verschiedener Forschungsgruppen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich), der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) und der Technischen Universität München (TUM).

Das WSL Forschungsprogramm Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements (CCAMM) untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Massenbewegungen in den Arbeitspaketen Gefahrendisposition und Dynamik, um die daraus resultierenden Risiken besser abzuschätzen und geeignete Anpassungsstrategien für die Gesellschaft zu entwickeln. Im Rahmen des CCAMM wurden auch Untersuchungen zum Fall Pizzo Cengalo gemacht. In künftigen Projekten sollen weitere Untersuchungen an verschiedenen Standorten in den Schweizer Alpen folgen.

Die Webseite «Landslide Blog» der American Geophysical Union (AGU) beinhaltet Kommentare und Erstauswertungen zu weltweit auftretenden «Rutschungen» in englischer Sprache. Unter das breite Spektrum fallen zahlreiche Massenbewegungsformen und das Archiv stellt die aktuellste, umfassendste und auf hohem wissenschaftlichen Niveau kommentierte Sammlung von Ereignissen dieser Art dar. Der Blog wird von Prof. Dr. Dave Petley von der Universität Sheffield, UK betrieben, einem renommierten Fachspezialisten im Fachbereich Rutschungen und Massenbewegungen. Mit Eintrag vom 24.2.2020 wird auch der Fall Kandersteg im Blog aufgeführt.

In Bezug auf die Situation in Kandersteg wird angeregt, in einer systematischen Suche ähnliche Fälle weltweit aufzuspüren und näher zu vergleichen. Beispiele wären:

- Chamoli landslide and debris flow to the Tapovan Vishnugad hydroelectric dam site 2021
- Bute Inlet: a very long runout proglacial landslide in Canada 2020
- Joffre Peak landslides in Canada 2019
- Glacier Bay National Park and Preserve in the southern part of Alaska (e.g. Lamplugh Glacier rock avalanche 2016)

4.2 Beispiel Pizzo Cengalo / Bondo

Anhand des jüngeren Fallbeispiels mit dem Bergsturz von 2017 am Pizzo Cengalo und die nachfolgende Serie von Murgängen und Gerinneereignissen können verschiedene wichtige Aspekte diskutiert und verglichen werden. Darunter fallen u.a. die Murgangbildung, die zentrale Rolle des Wassers und dessen Herkunft, Fragen der Materialzusammensetzung und Kornverteilung, das Abflussgeschehen, die Reichweiten und das Ablagerungsverhalten, aber auch Aspekte wie Monitoring und Dokumentation.

Nachfolgend Auszüge aus Gabbi et al. (2019, WEL).

Am Morgen des 23. August 2017 lösten sich aus der Nordostflanke des Piz Cengalo auf ca. 3000 m ü. M. rund 3 Mio. m³ Fels. Die Felsmassen stürzten zunächst auf den sich darunter befindenden Gletscher, flossen dann über moderat geneigte Schutthänge, über eine Felsstufe hinweg in Richtung Talboden und lagerten sich im Raum Laret (1380 m ü. M.) ab.

Durch die Einwirkung des Sturzes wurden 600 000 m³ Eis des Cengalo-Gletschers sowie 480 000 m³ Lockermaterial aus den alten Bergsturzablagerungen von 2011 unterhalb der Felsstufe erodiert. Durch die Aufnahme von Gletschereis wurde die Bergsturzmasse so weit gesättigt, dass sich in der Folge [am 23. August 2017] ein Schuttstrom mit einer Kubatur von 545 000 m³ entwickelt hat, der enorme Ablagerungen im Val Bondasca mit Mächtigkeiten von bis zu 10 m hinterlassen hat. Der Schuttstrom kam in Bondo kurz unterhalb der alten Brücke am Kegelhals zum Stillstand.

Daraufhin hat sich aus den durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagerungen eine Serie von Murgängen entwickelt. Gegen Abend des 23. August wurde die Kapazität des Auffangbeckens überschritten. Insgesamt kamen im Verlaufe des 23. August rund 220 000 m³ Material im Bereich des Geschiebesammlers zur Ablagerung.

Am Nachmittag des 25. August löste sich aus den labilen Massen ohne Beteiligung von Niederschlägen ein weiterer grosser Murgang mit rund 70 000–85 000 m³ aus. Am Abend des 31. August vermochten heftige Gewitterniederschläge rund 260 000–285 000 m³ Material aus den Bergsturzablagerungen zu mobilisieren, welche sich im Bereich der Einmündung der Bondasca in die Maira sowie in der Maira selbst abgelagert haben.

[...]

Aufgrund der Dringlichkeit einer Alarmanlage für mögliche Murgänge im Sommer 2013 wurde Ende Mai 2013 eine vorzeitige Baubewilligung für das Frühwarnsystem Bondo erteilt. Das Alarmsystem 2013 besteht aus einer Detektionsanlage in Prä, Lichtsignalanlagen in Bondo und den entsprechenden Schaltzentralen. Die Murgänge in Prä werden durch drei Reissleinen und einen Pegelradar detektiert. Ergänzt wurde die Anlage Prä durch zwei Kameras und eine Wetterstation. Die Alarmanlage in Prä bringt für Bondo eine Vorwarnzeit von ca. 2 Minuten. Im Jahre 2017 konnte eine zusätzliche Detektionsanlage in Lera mit ca. 4 Minuten Vorwarnzeit erstellt werden. Anstatt der Reissleinen werden für die Detektion neu je zwei redundante Pegelradare in Lera und Prä eingesetzt. Die Anlage wurde zudem mit weiteren Kameras, Seismometern in Lera und einem Georadar auf der Sciora-Hütte ergänzt.

[...]

In der Zone zwischen der Mehrzweckhalle/Schreinerei und der Kantonsstrasse wurde ein grosses Auffangbecken für Geschiebe mit einem Rückhaltevolumen von rund 170 000 m³ realisiert. Durch die granularen Murgänge wurde die Wirkung der Schutzdämme gar verstärkt, indem sich in den randlichen Bereichen des Rückhalteraums natürliche Dämme (sogenannte Levées) gebildet und weitere Übermurungen eingegrenzt haben.

[...]

Murgänge durch progressive Erosion von Lockermaterialablagerungen entstehen aufgrund von Oberflächenabfluss nach Niederschlägen. Die Magnitude der Murgänge hängt dabei primär von der Intensität und der Summe der Niederschläge ab. Eine grosse Vorfeuchte in den Ablagerungen (wie dies am 31. August 2017 beobachtet wurde) erhöht die Magnitude stark.

Bei einer progressiven Verflüssigung der abgelagerten Murgänge führen kleine Hanginstabilitäten (2017 im Val Bondasca beispielsweise auch durch Schmelzwassereintrag der umliegenden Gletscher ausgelöst) zu einer progressiven Verflüssigung von stark durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagerungen. Dies ist nur bei einer ausserordentlich hohen Vorfeuchte in den Ablagerungen möglich.

[...]

Die Auslösung von Murgängen aus einer Sturzablagerung bei Bondo veranschaulicht das grosse Potenzial von Massenverlagerungen in Prozessketten, insbesondere beim Zusammentreffen von verschiedenen Förderfaktoren, wie etwa der Aufnahme von Gletschereis und Aufsättigung der Sturzmasse sowie dem Vorhandensein einer bereits vorgängig abgelagerten Sturzmasse.

Aus dem Verhältnis von Sturzmasse zu weiterverlagertem Volumen in zahlreichen Ereignissen werden die Dimensionen für Reichweiten, Schutzmassnahmen und Rückhalteräume ersichtlich und anhand des Ereignisbeschriebs sind auch zeitliche Dimensionen und eine Abschätzung des Interventionszeitraums möglich.

Der Fall Bondo ist klar nur als mögliches Beispiel mit teilweise ähnlichen Elementen wie sie in Kandersteg vorhanden sind anzusehen. Er veranschaulicht jedoch gut, welche Szenarien betrachtet und genau analysiert werden müssen.

Nachfolgend Auszüge aus Tognacca et al. (2019, WEL).

Am Morgen des 23. August 2017 lösten sich aus der Nordwestflanke des Pizzo Cengalo rund 3 Mio. m³ Fels. Durch eine ungünstige Prozessverkettung von Bergsturz und Gletscherverflüssigung konnte sich aus den durchfeuchteten und äusserst labilen Sturzablagerungen eine Serie von Murgängen entwickeln.

Für die laufende Gefahrenbeurteilung und die Ereignisbewältigung war eine gute Dokumentation der Ereignisse von August 2017 von grosser Wichtigkeit.

Durch die massive Einwirkung des Bergsturzes wurden rund 600 000 m³ Eis des Cengalogletschers erodiert. Aufgrund des ausserordentlich hohen Wassergehaltes konnte sich ein Teil der Sturzmasse verflüssigen und sich zu einem Schuttstrom entwickeln, der mächtige Geschiebeablagerungen im Val Bondasca hinterlassen hat und bis nach Bondo vorgedrungen ist. Durch die hohe Verfügbarkeit von durchfeuchteten Ablagerungen hat sich in der Folge ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen eine Serie von Murschüben ausgebildet, die enorme Geschiebemengen nach Bondo brachten.

[...]

In der Folge entwickelten sich aus den durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagerungen, zunächst ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen, mehrere Murgänge, welche innerhalb von neun Tagen rund 500 000 m³ Geschiebe nach Bondo brachten.

Am Abend des 31. August 2017 löste ein starker Gewitterniederschlag einen riesigen Murgang mit einer Kubatur von über 200 000 m³ (in einem Schub!) aus, welcher massive Ablagerungen im Einmündungsbereich in die Maira hinterlassen hat.

Zur Simulation der Rheologie aller Prozesse kam ein turbulenter Ansatz mit einer Grenzschubspannung und einem Coulomb-Reibungsterm zur Anwendung (vgl. Naef et al., 2006). Zusätzlich wird ein basaler Widerstand durch einen Coulomb-Reibungsterm, der proportional zur Normalspannung ist,

verwendet. Die Modellparameter (Grenzschubspannung τ_B , Reibungsbeiwert nach Strickler k_{str} , Reibungsgefälle μ) wurden anhand der Beobachtungsdaten für das jeweilige Ereignis kalibriert. Das Fließverhalten im verwendeten Zweiphasenmodell FLUMEN wird über den Wassergehalt gesteuert, indem die Fließparameter (Grenzschubspannung, Coulomb'scher Reibungsterm) als Funktion der Wasserkonzentration definiert werden. Die Grenzschubspannung τ_B wurde zwischen 1000, 1500 und 3000 N/m² variiert, um die natürliche Streubreite der rheologischen Parameter zu berücksichtigen [Gabbi et al. 2019]. Die rheologischen Parameter für die Murgänge wurden anhand der Nachrechnungen der beobachteten Ereignisse (sowohl 2012 wie auch 2017) validiert.

Die Abflüsse wurden zunächst basierend auf den beobachteten Abflüssen in der Ortschaft Prä bzw. in der Transitstrecke für den Kegelhalbs definiert und wurden später in der Kalibrierungsphase bei Bedarf angepasst, um eine möglichst optimale Übereinstimmung zu erzielen.

Die Simulationsergebnisse der verschiedenen untersuchten Prozesse zeigen generell eine sehr gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

Mittels des Zweiphasenmodells ist es gelungen den Übergang eines Bergsturzes in einen Schuttstrom zu simulieren. Die Simulationen lassen darauf schliessen, dass das erodierte Eis des Cengalogletschers entscheidend zur Verflüssigung der Sturzmasse beigetragen hat. Die Modellierungen zeigen jedoch auch, dass der Übergang eines Bergsturzes in einen Schuttstrom ein sehr komplex abzubildender Prozess ist und sehr sensitiv auf den genauen Ort und Zeitpunkt der Wasser- bzw. Eisaufnahme reagiert.

[Ende der Auszüge aus den beiden WEL Publikationen]

Die Artikel betonen die Wichtigkeit einer guten Dokumentation eines Ereignisses für eine fundierte Analyse. Beim Prozessbeschrieb wird auf das grosse Geschiebepotential einer gesättigten Sturzmasse und die Möglichkeit von Ereignisauslösungen ohne zusätzlichen Niederschlag hingewiesen. Die Ausführungen weisen auf (z.T. grosse) mögliche Schubvolumen hin, welche bei solchen Kaskadenprozessen möglich sind.

Das Zweiphasenmodell FLUMEN wird beschrieben und das Vorgehen der durchgeführten Simulationsberechnungen erläutert und beurteilt. Hierzu ist anzumerken, dass eine explizite Änderung des Wassergehaltes mit Auswirkung auf die Modellparameter nur bei (wenigen) gängigen Murgangmodellen möglich, so z.B. auch bei FLO-2D.

Nachfolgend Auszüge aus Demmel (2019, MA-Thesis).

"A conceptual semi-distributed water balance model was built to represent the hydrological processes in the basin. The simple water balance approach met the observed rainfall-runoff response remarkably well. The simulations were replicating the basic characteristics of water storage and flow formation, while most peak flows as well as the winter base flows were underestimated.

The results from hydrological modelling suggested that after heavy rainfalls in the beginning of August 2017, the soil water content in the deposits had again declined to 2-3 % when on 23 August 2017 the rock slope failure at Pizzo Cengalo hit the valley bottom.

The water content in the simulated rock avalanche deposits originated from soil water erosion and to a major fraction from the glacier ice melt. The generated water volume could not provide the required amounts of water for the first and immediate debris flow surge which was estimated to contain 40 % of water (210'000 m³).

The amount of water in the rock avalanche deposits required to form the first debris-flow surge could not be obtained by the water volumes currently available in the system. Only the assumption of additional water sources could lead to the generation of water volumes sufficient to explain the debris flows.

The presence of water pockets in the glacier would increase the water in the debris-flow initiation zone by approx. 65'000 m³ and higher initial rock temperatures could have enhanced the ice melt by up to 30 %.

[...]

...a stationary water source in the basin needs to be considered. This inactive storage would not contribute to runoff unless it is activated by e.g. a major rock avalanche event. The presence of such an unknown and hardly assessable water storage could pose a severe problem to the forecasting of debris flows based on hydrological modelling.

Table 4 [Demmel, 2019]: Simulated water volumes in the deposits of the Cengalo rock-ice avalanche on 23 August 2017 for different scenarios. The soil water content of the erodible scree layer was set to 2 %.

Parameter	observed [m ³]	simulated [m ³]			
		Distributed soil water	High rock temperatures	Water pockets	Worst case
Ice entrained	600'000	600'000	600'000	600'000	600'000
Ice melted	-	90'000	120'000	90'000+65'000	120'000+65'000
Scree entrained	810'000	800'000	800'000	800'000	800'000
Water entrained	-	15'000	15'000	15'000	15'000
Water in deposits	-	105'000	135'000	170'000	200'000

[...]

... the sediments along the channel might be close to saturation due to the presence of the stream-flow. When the rock avalanche overrode these areas, a great amount of water might have locally been available."

Die Ausführungen bringen bei der Interpretation des Prozessablaufes weitere mögliche Wasserquellen ins Spiel und weisen auf die komplizierte Prognose des Abflusses bei der Anwendung von hydrologischen Modellen und Bestimmung von Murgängen hin.

Anmerkung: Ein möglicher Wasserbeitrag aus einem potentiell «gesättigten» Bachbett der Bondasca im Bereich oberhalb von Prä wurde nicht explizit betrachtet. Eine grobe Schätzung ergibt: $B_{\max} = 25 \text{ m}$, $T = 1 \text{ m}$, $L = 1000 \text{ bis } 2000 \text{ m}$, und Porosität = 0.5 (mit Wasser gefüllt) daraus ergibt sich $V_w = 12'000 \text{ bis } 25'000 \text{ m}^3$.

In Bezug auf Kandersteg wird offensichtlich, dass dem Wasser aus dem Oeschinensee eine wesentliche Rolle bei der Mobilisierung und Reichweite von Gerinneprozessen im Öschibach zukommt.

Nachfolgend Auszüge aus Walter et al. (2020, Geom).

"A large debris flow with an initial volume of approximately $0.545 \pm 0.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ was initiated with a delay of approximately 30 s (...) after the deposition of the rock avalanche. This event was followed by ten debris flows within 9.5 h and another two debris flows two days after rock avalanche deposition (...). Notably, remobilization of the debris within these two days occurred in the absence of rainfall. A week after the rock avalanche, two debris flows occurred during precipitation on 31

August 2017. Direct observations show that the first debris flow was a highly viscous, slow moving phenomenon. The initial velocity of the first debris flow was approximately 8 m/s and can be reconstructed from the initiation time derived from the seismic data analysis and the triggering time of the early warning system in "Prä" [...]. These observations suggest an average velocity of 2 m/s. [...]

Approximately one hour after the rock avalanche, helicopter-borne observations of a distinct channel in the rock avalanche deposition indicate that the first debris flow originated from Area 3 (Fig. 2d). [...] This shows that the first debris flow formed with a delay of around 30 s after the rock avalanche was deposited [...]. Observations from the helicopter show 12 additional debris flows on 23 and 25 August that reached the retention basin in Bondo [...].

The total volume of the ten debris flows following the first major one on 23 August 2017 was $2.20\text{--}2.3 \times 10^5 \text{m}^3$. The first eight debris flows did not cause damage in the village of Bondo, but successively filled the debris flow retention basin."

Die Ausführungen belegen die u.U. sehr rasch mögliche Auslösung von Folgeereignissen aus Sturzablagerung (Schuttstrom), wenn diese aus gesättigtem Lockermaterial bestehen.

4.3 Modellierung und Reichweite von Murgängen (und Bergstürzen)

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Themenbereichs Modellierung und Reichweite von Murgängen (und Bergstürzen) für die Gefahrenbeurteilung von Wildbächen ganz allgemein, wurde dazu ein kurzes Review erstellt (Rickenmann, 2021). Im Sinne einer Zusammenfassung der wichtigsten Befunde ist hier das Schlusskapitel «Empfehlungen für die Modellierung von Murgängen» (in leicht komprimierter Form) wiedergegeben:

- A. Die folgenden Faktoren beeinflussen die Reichweite von Murgängen: Volumen, Topographie, und Materialeigenschaften (Wassergehalt, Anteile Grob- und Feinmaterial).
- B. Der dimensionslose Mobilitätskoeffizient k_B kann in erster Näherung als ein einfaches Mass für die Materialeigenschaften betrachtet werden. Aufgrund der Studie von Scheidl & Rickenmann sowie ein paar weiteren Daten könnte man grob drei Mobilitätsklassen definieren: wenig mobil für $5 < k_B < 25$; mittel mobil für $25 < k_B < 45$; stark mobil für $45 < k_B < 65$.
- C. Bei 2d numerischen Simulationsberechnungen ist zu erwarten, dass ein Zusammenhang besteht zwischen den wichtigen Modellparametern für das Abbremsverhalten von Murgängen (basaler Reibungskoeffizient μ beim Voellmy Ansatz; Grenzschubspannung τ_B bei der «quadratischen» Rheologie des FLO-2D Ansatzes) und der Topographie.
- D. In Anbetracht der grossen Unsicherheiten wird empfohlen, verschiedene Modellansätze zu verwenden, ähnlich wie das auch bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten gemäss dem Verfahren HAKESCH in BWG (2003) empfohlen wird.
- E. Eine grobe Abschätzung einer mittleren Reichweite eines Murganges kann z.B. mit der empirischen Gleichung von Rickenmann (2014; Gl. 4-6), rote Gleichung in Fig. 9b, bzw. einer maximalen Reichweite mit einer leicht modifizierten Gleichung von Rickenmann (2014; Gl. 4-7) gemacht werden (s. auch Fig. 8b). Für Bergstürze kann entsprechend z.B. die blaue Gleichung in Fig. 9b verwendet werden.

- F. Gemäss diesem Literaturreview ist es möglich, dass der basale Reibungskoeffizient μ beim Voellmy Ansatz in einer numerischen Simulation (wie z.B. mit DAN3D oder mit RAMMS) mit dem Gefälle der (erwarteten) Ablagerungszone und dem Mobilitätskoeffizienten k_B zusammenhängt. Eine grobe Abschätzung einer mittleren Reichweite kann z.B. mit den empirischen Gleichungen in E gemacht werden, da die mögliche Ablagerungszone ja nicht a priori bekannt ist.
- G. Bei den mit einem numerischen 2d Modell simulierten Ereignissen sollte die gesamte (planimetrische) Ablagerungsfläche (B) bestimmt und zusammen mit dem Murgangvolumen (V) der (simulierte) Mobilitätskoeffizient $k_B = B/V^{2/3}$ berechnet werden. Damit kann das simulierte Ausbreitungsverhalten grob in eine Mobilitätsklasse eingeordnet werden (s. Punkt B oben), und so könnten auch Simulationsresultate mit verschiedenen Modellansätzen besser miteinander verglichen werden.
- H. Für ein definiertes Gesamtvolumen eines Wildbach- oder Murgangereignisses (oft eine Annahme bei der Gefahrenbeurteilung) kann eine unterschiedliche Anzahl an einzelnen Murgangschüben auftreten. Die Ablagerungen eines Schubes (auf dem Kegel) können das Fliess- und Ablagerungsverhalten von nachfolgenden Schüben beeinflussen. Es sollten daher mehrere Szenarien mit unterschiedlicher Anzahl und Grösse der Teilschübe betrachtet werden und die Ablagerungstopographie zwischen den Schüben aufdatiert werden.
- I. Zur Abschätzung einer Murgangganglinie z.B. am Kegelhals wird oft eine semi-empirische Beziehung zwischen Maximalabfluss (Q_{max}) und Murgangvolumen (V) verwendet, wie z.B. in Rickenmann (2014; Gl. 4-2, Gl. 4-3) angegeben. Der Exponent dieser Beziehung(en) beruht auch auf Ähnlichkeitsüberlegungen. Allerdings ist zu erwarten, dass Q_{max} bei (beliebig) grossen V nicht immer weiter ansteigt (auch wenn nur ein einziger Schub auftreten würde). Aufgrund der Analyse der Murgangereignisse von 1987 in der Schweiz sowie der Daten in Mizuyama et al. (1992) wird empfohlen, diese Gleichung für granulare Murgänge nicht für Schubvolumen grösser als etwa 50'000 m³ anzuwenden. Für schlammstromartige Murgänge gibt es Hinweise, dass ein solches Potenzgesetz für Volumen bis zu ca. 1 Mio. m³ gültig sein könnte.

Generell muss erwähnt werden, dass es im Themenbereich Murgangmodellierung, Reichweite, Einfluss von Topographie, Modellrheologie und Modellparameter bzw. Materialeigenschaften auf die Simulationsresultate, insbesondere auch im Hinblick auf die praktische Anwendung viel zu wenige systematische Untersuchungen gibt. Eine kleine Studie diesbezüglich ist in Raymond et al. (2018) diskutiert. In Anbetracht der vielen Gefahrenbeurteilungen von murfähigen Wildbächen in der Schweiz und in den Alpen und der aufwändigen Schutzmassnahmen besteht hier ein dringender Handlungsbedarf für mehr angewandte Forschung bezüglich dieses wichtigen Themenbereiches (vgl. auch Rickenmann & Badoux 2018). So könnten z.B. auch mögliche Abhängigkeiten zwischen dem Voellmy-Modellparameter μ und dem Kegelgefälle bei der Ablagerung sowie dem Mobilitätskoeffizienten k_B detailliert untersucht werden, wie sie in Kap. 5 in Rickenmann (2021) andiskutiert sind.

4.4 Oeschinensee / Seepegelschwankung, Niederschlag, Abfluss

Bei der Diskussion rund um einen potentiellen Anstieg des Seepiegels des Oeschinensees durch künftige Sturzablagerungen hat uns interessiert, wie der See auf Niederschläge im rund 22 km² grossen Einzugsgebiet reagiert und inwiefern der See dämpfend auf den Abfluss im Öschibach wirkt. Der Oeschinensee ist bei normalem Wasserstand knapp 60 m tief und hat eine Fläche von rund 1 km². Er entstand durch den jüngsten Bergsturz vor rund 2300 Jahren (Köpfli et al. 2018).

Der Öschibach fliesst heute unterirdisch durch die Abriegelung des Sees im Bereich Holzspicher ab, tritt aber bald darauf wieder als Quellen ans Tageslicht. Sein Wasser wird zur Trinkwasserversorgung von Kandersteg und zur Stromproduktion genutzt. Der Öschibach mündet in Kandersteg in die Kander. Laut Aussage der Licht- und Wasserwerk AG Kandersteg (LKW) liefern die Quellen der Trinkwasserfassungen Holzspicher (1530 m ü.M.) und Chalberspissi (1503 m ü.M.) sehr sauberes, weiches und vor allem sehr konstant Wasser zur Zentrale Zilfuri.

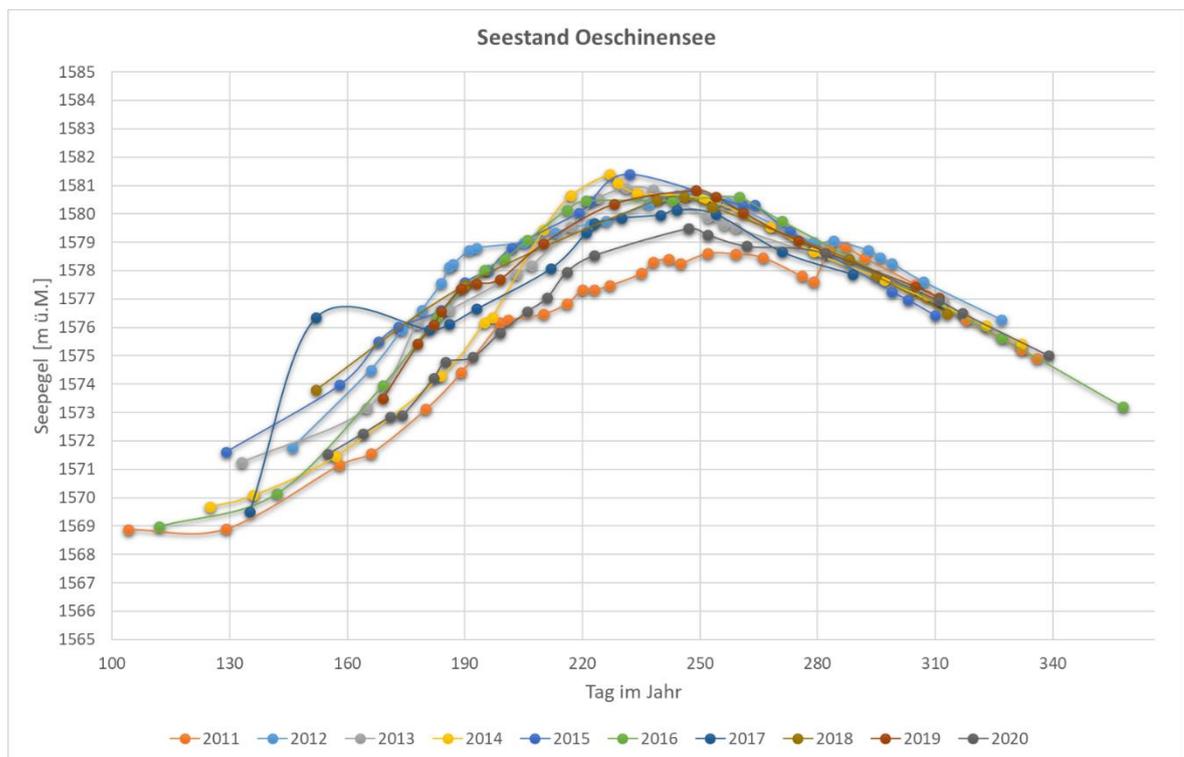


Abbildung 2: Seestand Oeschinensee in den Jahren 2011 bis 2020 (Quelle: Licht- und Wasserwerk AG Kandersteg)

Die Schwankung des Seepiegels im Oeschinensee ist beträchtlich (Abbildung 2). Die Seehöhe, welche auf der Landeskarte mit 1578 m ü.M. angegeben wird, variiert im Jahresverlauf um über 10 m. Der Tiefststand wird über die Frühjahrsmonate erreicht (1569 m ü.M.) und steigt ab ca. Mai mit der Schneeschmelze und zusätzlichem Wassereintrag aus dem Abfluss der zufließenden Bäche bei Niederschlag auf über 1580 m ü.M. an. Der maximale Seepiegel wird zwischen Juli und September erreicht. Der Anstieg erfolgt in der Regel etwas rascher als das Absinken des Pegels.

Der See wirkt sich dämpfend auf die Abflussganglinie des Öschibachs aus. Auch die Schwankung des Pegels ändert den Abfluss resp. die Fassungsmenge an den Trinkwasserquellen der Licht- und Wasserwerk AG Kandersteg (LKW) nur unwesentlich.

Die Reaktion des Seepiegels auf Flüssigniederschläge soll anhand von Niederschlagsdaten der IMIS-Station Fisistock (FIS2, 2155 m ü.M.) noch näher untersucht werden. Der Flüssigniederschlag wurde an der Station Fisistock (FIS2, 2155 m ü.M.) bis Ende 2017 in einem Messintervall von 30 min erfasst. Ab 2018 liegen Daten mit Messintervall 10 min vor, wurden aber nicht visualisiert, weil in der vorliegenden Datei grössere Datenlücken bestehen.

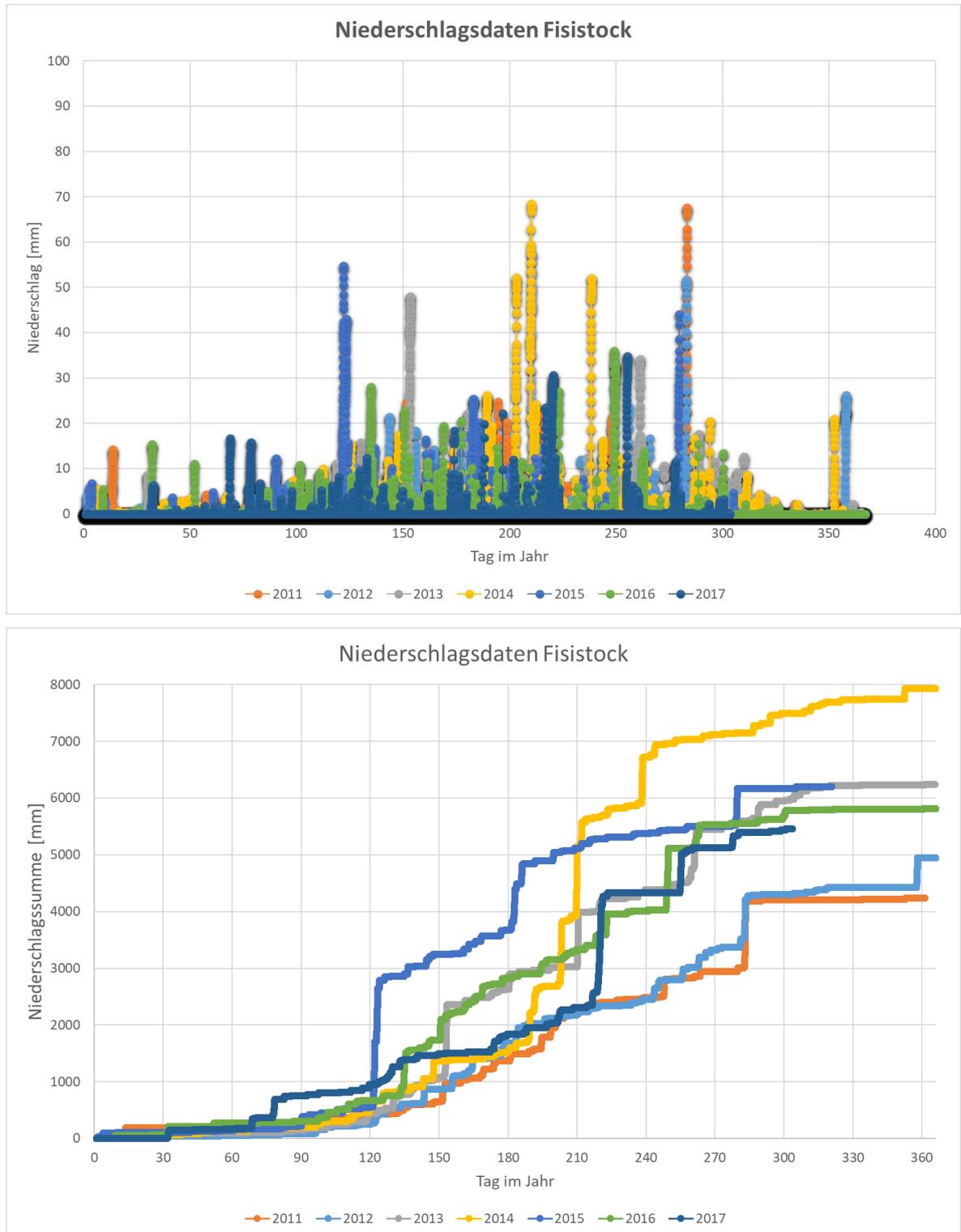


Abbildung 3: Niederschlagsdaten (Flüssigniederschlag) an der Station Fisistock (2155 m ü.M.) für die Jahre 2011 bis 2017 (Quelle: IMIS, SLF) mit Darstellung der Niederschlagssummen je Niederschlagsereignis (oben) und den Summenkurven je Jahr (unten).

Gemäss NDR/Hunziker (2020) (dort: p.4) würde ein mittlerer Jahresniederschlag den See mit 44 Mio. m³ Wasser um 34 m anheben (ohne Abfluss). Für einen Pegelanstieg um 11 m kann man aus Tab. 1 in NDR/Hunziker (2020) ein Wasservolumen von 13.9 Mio. m³ interpolieren, und die Differenz zum vollen See beträgt dann 30.1 Mio. m³. Lässt man dieses Volumen innerhalb eines Jahres gleichmässig abfliessen, ergibt sich ein Q von 0.95 m³/s. Ein konstanter Durchfluss durch den Damm und Austritt bei den Quellen in Holzspicher in dieser Grösse scheint zu hoch zu sein (dies wird auch von den Erstbearbeitern so eingeschätzt). Es muss daher davon ausgegangen werden, dass ein Teil im Boden versickert und einen unbekanntes Fließweg nimmt.

Gemäss den Daten der Station Fisistock (Abbildung 3) liegt der mittlere Jahresniederschlag zumindest in dieser Höhenlage deutlich höher als die in NDR/Hunziker (2020) angenommenen 2000 mm für den mittleren Jahresniederschlag. Durch den rund 2- bis 3-mal höheren Wert relativiert sich die Aussage bezüglich Fülldauer für einen Einstau des Oeschinensees bei einer Erhöhung der Dammkörone durch eine Sturzablagung.

Weitere Ausführungen dazu finden sich im Kap. 0

5 Sturzablagerung und deren Mobilisierung als Murgänge

Zusammenfassung der Befunde

Als Langfristfolge von Gletscherrückzug können Änderungen in den Spannungsfeldern von Felswänden auftreten und Instabilitäten hervorrufen oder fördern. Auch die Bildung von neuen Gletscherseen wird möglich. Die Degradation von Permafrost als Folge von Klimaerwärmung kann ebenso ein Förderfaktor für Hanginstabilitäten sein.

In Bezug auf künftige Naturgefahrenprozesse bedeutet dies, dass auch Situationen jenseits des historischen Erfahrungshorizontes eintreten können. Zudem werden in Gebirgsräumen weltweit vermehrt Ketten von interagierenden Prozessformen beobachtet. Eine beschleunigte Entwicklung in der Klimaveränderung äussert sich mitunter auch in einem erhöhten Tempo bei deren Abfolge solcher Prozessketten.

Verschiedene Untersuchungen postulieren eine starke und über eine gewisse Zeitspanne anhaltende erhöhte Geschiebelieferung in Einzugsgebieten mit rezenten Sturzprozessen. Die grundsätzlich erwarteten Veränderungen sind demnach (gemäss Abteilung für Naturgefahren 2019):

- Wechsel von geschiebe- zu wasserlimitierten System
- Veränderung der Korngrößenverteilung hin zu feineren Fraktionen
- Beide Punkte führen dazu, dass Geschiebeverfrachtungen im Öschibach häufiger auftreten.

Beurteilung

Wir stimmen den obigen Einschätzungen zu und möchten insbesondere die folgenden Punkte unterstreichen:

- Die historischen Sturzereignisse im Raum Kandersteg zeugen von den Langfristfolgen des Gletscherrückzugs. Die Aktivierung der instabilen Masse im Bereich Spitze Stei wird mit hoher Wahrscheinlichkeit diesem Phänomen und der Degradation von Permafrost zugeordnet.
- Im Raum Kandersteg sind Situationen jenseits des historischen Erfahrungshorizontes wahrscheinlich und es muss mit dem Eintreten von (beschleunigten) Prozessketten, resp. Kaskadeneffekten gerechnet werden.
- Die beschriebene Phase erhöhter Aktivität tritt nach massgeblichen Sturzereignissen mit hoher Wahrscheinlichkeit ein.

5.1 Primärprozesse Sturz und Betrachtung möglicher Reichweiten

Zusammenfassung der Befunde

Bericht Sekundärprozesse (NDR/Hunziker 2020):

Seit 2019 haben die Bewegungen am Spitze Stei so stark zugenommen, dass grössere Abbrüche von wenigen 100'000 m³ bis maximal 20 Mio. m³ Gestein erwartet werden.

Die bestehenden Bergsturzablagerungen (Fisistock und Oeschinensee) zeigen beide einen sehr hohen Anteil an feinkörnigen Sedimenten (siehe Abbildung 1). Aufgrund des starken Auflockerungsgrades des Gesteins am Spitzen Stei, muss auch für die sich abzeichnenden Sturzereignisse von feinkörnigen Ablagerungsprodukten ausgegangen werden. Der Blockanteil (Blöcke > 1 m³) dürfte bei kleinen Sturzvolumen eher gering sein. Die Blöcke 'schwimmen' in der Masse mit.

Zweitmeinung (CSD / SLF 2020) zum Bericht Sturz (GEOTEST 2019):

Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeiten mittels Experteneinschätzungen zu quantifizieren. Dies wurde für die Bergsturzzenarien in Brienz/Brinzauls (GR) durchgeführt. Gleichzeitig wurde auch die Parametrisierung der Auslaufmodellierung mit Wahrscheinlichkeiten belegt (...), um eine probabilistische Darstellung der Wirkungsräume zu erlangen. Dieses Vorgehen ist empfehlenswert, da damit eine quantitativere Entscheidungsgrundlage für allfällige Massnahmen bereitgestellt wird.

Die Wahl von μ , im speziellen des pessimistischen Wertes, muss jedoch diskutiert werden. Die Bandbreite der möglichen Werte, die dieser Parameter annehmen kann, ist sehr unsicher und Gegenstand des aktuellen wissenschaftlichen Diskurses.

Eine Volumenabhängigkeit von μ wird weder durch die Fallstudien im Bericht [Sturz (GEOTEST 2019), Tabelle 2] noch durch die Fallstudiensammlung von [Jordan & McDougall 2019] bestätigt. In letzterer Studie wird jedoch argumentiert, dass das Auslaufverhalten eher vom Material entlang des Pfades abhängt.

Im Vergleich zu diesen Literaturwerten zeigt sich also, dass die gewählten *best-guess* Werte von 0.2 / 0.25 eine sinnvolle Wahl sind, jedoch die pessimistischen Werte von 0.15 / 0.2 nicht zwingend realistischen *worst-case* Szenarien entsprechen. Die Abbildung 10, in *Zweitmeinung (CSD / SLF 2020)* zeigt, dass sogar Werte von $\mu < 0.1$ bei Fällen vorkamen, bei denen die Absturzmasse nicht auf Gletschereis oder Schnee auslief.

Beurteilung

Bemerkungen zum Bericht Sekundärprozesse (NDR/Hunziker 2020):

Wir erachten diese Einschätzungen als plausibel.

Bemerkung zu Abb. 10 im Bericht Zweitmeinung (CSD / SLF) bzw. Aaron & McDougal (2019):

Man könnte zusätzlich prüfen, wie sich das Gefälle der Topographie im Ablagerungsbereich zu den rückgerechneten Werten von μ verhält (s. Kap. 4.4.).

Weitere Beispiele sind in Kap. 5.5 aufgeführt, wo der Untergrund (und insbesondere Schnee- oder Gletscher) einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite gespielt hat. vgl. Bemerkungen im nachfolgenden Kap. 5.5)

Bemerkungen zu den Sekundärprozessen im Bericht Sturz (GEOTEST 2019)

In ähnlicher Weise wie für die Bergstürze kann auch die RAMMS Murgangmodellierung (Anhang 5.1 im Bericht von GEOTEST 2019) «plausibilisiert» werden. Dabei wurde angenommen, dass der Anriss (Start) des Murgangs auf Kote 1700 m ü.M. im Staubbach erfolgt. Für die «realistische» RAMMS Modellierung erreichte der Murgang von 37'000 m³ ca. den Standort Chappeli (ca. 1200 m ü.M.), und hat somit eine Reichweite von ca. 1700 m.

Für die Murgänge machten wir einige Abschätzungen zur Reichweite L (m) in Abhängigkeit der Höhendifferenz H (m) und des Volumen V (m³) gemäss der roten Gleichung in Fig. 9b von Rickenmann (2021): $L = 1.9 H^{0.83} V^{0.16}$. Für einen etwas ungünstigeren Fall rechneten wir mit einer um den Faktor 1.5 grösseren Reichweite (d.h. mit einem Vorfaktor von 2.85). Für die gleiche Reichweite (bis Chappeli) wie in der RAMMS Modellierung wäre für den mittleren empirischen Trend ein Volumen von ca. 30'000 m³ nötig. Rechnet man aber mit dem ungünstigeren Fall (mit einem Vorfaktor von 2.85), so sind für die gleiche Reichweite nur etwa gut 2000 m³ nötig. Für den gleichen Anriss (Start) des Murgangs und eine Reichweite bis zur Kandermundung wäre für den mittleren empirischen Trend ein Volumen von ca. 60 - 80'000 m³ nötig, für den ungünstigeren Fall ein solches von ca. 5 - 10'000 m³. Diese Berechnungen illustrieren die grosse Unsicherheit bei den Murgangabschätzungen.

Bemerkungen zu den Primärprozessen im Bericht Sturz (GEOTEST 8.4.2019)

Gemäss unserem Literaturreview (Rickenmann 2021) ist es möglich, dass der basale Reibungskoeffizient μ beim Voellmy Ansatz in einer numerischen Simulation (wie z.B. mit DAN3D oder mit RAMMS) mit dem Gefälle der (erwarteten) Ablagerungszone und dem Mobilitätskoeffizienten k_b zusammenhängt. Grössere Bergstürze haben generell grössere Reichweiten.

Für Bergstürze bei Kandersteg machten wir einige Abschätzungen zur Reichweite L (m) in Abhängigkeit der Höhendifferenz H (m) und des Volumen V (m³) gemäss der blauen Gleichung in Fig. 9b von Rickenmann (2021): $L = 0.65 H^{0.83} V^{0.16}$. Für die zwei historischen Bergstürze erhalten wir ein ungefähres Volumen von $V_1 =$ ca. 8 bis 15 Mio. m³ für den Sturz vor ca. 2300 Jahren (Köpfli et al. 2018) sowie von $V_2 =$ ca. 1500 bis 2500 Mio. m³ für den Sturz vor ca. 3200 Jahren (Singeisen et al. 2020). Für den älteren Sturz der bis in den Talgrund gelangte, ist das geschätzte Volumen V_2 etwas grösser als das beobachtete Volumen (rund 750 bis 900 Mio. m³). Für den jüngeren Sturz der bis zum Gegenhang im Schattwald gelangte, ist das Volumen V_1 deutlich kleiner als das beobachtete Volumen (rund 37 bis 46 Mio. m³). Ein Grund dafür könnte das starke Abbremsen dieses Sturzes am Gegenhang sein. Die Mehrheit der empirisch ausgewerteten Bergstürze dürften eher ein typisches Längsprofil haben wie dies in Fig. 8b in Rickenmann (2021, aus Staron & Lajeunesse 2009) gezeigt ist.

Für die DAN3D Simulation des älteren Sturzes in Singeisen et al. (2020) wurde ein optimaler μ Wert von 0.04 gefunden, welcher in der Nähe des Talgefälles liegt. Für die DAN3D Simulation des jüngeren Sturzes in Köpfli et al. (2018) wurde ein recht hoher μ Wert von 0.58 für die Ablagerungszone gewählt; dieser Wert reflektiert wahrscheinlich das starke Abbremsen des Sturzes am Gegenhang.

Auch für mögliche zukünftige Bergstürze vom Spitzen Stei machten wir einige Abschätzungen zur Reichweite L (m) in Abhängigkeit der Höhendifferenz H (m) und des Volumen V (m³) gemäss der blauen Gleichung in Fig. 9b von Rickenmann (2021): $L = 0.65 H^{0.83} V^{0.16}$. Bezüglich der Stürze die etwa bis zum Oeschinensee gelangen würden, schätzten wir ein Volumen von ca. 0.8 bis 1.5 Mio. m³, für zwei alternative Anrisspositionen (2900 bzw. 2500 m ü.M.) und ohne Aufprall auf den

Gegenhang. Für einen möglichen zukünftigen Sturz vom Spitzten Stei, welcher bis zur Kanderemündung gelangt, schätzen wir ein Volumen von ca. 20 bis 50 Mio. m³.

Mit den obigen Abschätzungen können die RAMMS bzw. DAN3D Simulationen möglicher Bergstürze vom Spitzten Stei im Bericht von GEOTEST «plausibilisiert» werden. Gemäss diesem Bericht erreichen für beide Modelle Volumina von 1 bis 3 Mio. m³ den Öschibach unterhalb des Oeschinensees, was in etwa mit der empirischen Abschätzformel übereinstimmt. Das grösste simulierte Volumen von 15 Mio. m³ (mit RAMMS) erreicht etwa Kote 1240 m ü.M. im Öschibach und stoppt somit ca. 1 km oberhalb der Kanderemündung. Dies ist wiederum plausibel im Vergleich zu unserer empirischen Formel, wonach ein 2- bis 3-mal grösseres Volumen nötig ist für eine Reichweite bis zur Kanderemündung.

5.2 Ablagerungsverhalten und Interaktion mit Oeschinensee

Zusammenfassung der Befunde

Bericht Sekundärprozesse (NDR/Hunziker 2020):

- Die Geländeinterpretation und Analogieschlüsse aus den bekannten Fels- und Bergsturzereignissen in Kandersteg lassen Rückschlüsse auf künftige Sturzereignisse und der Folgeprozesse zu.
- Damit den Sturzprozessen nachgelagerte Folgeprozesse auftreten können, müssen verschiedene Voraussetzungen und Rahmenbedingungen erfüllt sein. Diese betreffen einerseits den Sturzprozess selber, aber auch das Aufstauverhalten des Oeschinensees oder die hydrologischen Voraussetzungen.
- Die Mächtigkeit der Ablagerung gibt vor, wie stark sich Erosionsprozesse eintiefen können. Bei den Sturzereignissen vom Spitzten Stei werden Ablagerungsmächtigkeiten von maximal 30 m erwartet.
- Gemäss den Modellierungen der Felsstürze aus dem Spitzten Stei (GEOTEST 2019, Anhang 1) ist ein Ablagerungsprozess möglich, welcher einen relativ flachen Ablagerungskörper in der Sattelzone und talabwärts des Spitze Stei verursacht. Bei einem relativ trockenen Sturz wäre auch eine Ablagerung möglich, welche einen steileren Damm in der Sattelzone verursachen würde.
- Relevante Terrainveränderungen durch die Sturzablagerungen im Bereich der Sattelzone (Damm) ergeben sich gemäss Bericht GEOTEST (2019) erst bei sehr grossen Fels- resp. Bergsturzereignissen von mehr als 3 Mio. m³.
- Beim Auftreten von Sturzablagerungen im Bereich Oeschinensee Westende - Holzspicher von mehreren Metern Mächtigkeit, kann davon ausgegangen werden, dass die bestehenden unterirdischen Abflusswege zerstört werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass eine Entleerung des Oeschinensees nur bis zum aktuellen Seeniveau von 1578 m ü. M. möglich wäre. Die Annahme wird damit begründet, dass sich die Eintiefung im Nachgang zum historischen Oeschinenseebergsturz auf diesem Niveau stabilisiert hat und somit eine erosionsresistente Schicht vorliegt.

Beurteilung

Wir erachten diese Punkte allesamt als plausibel. Der Ablagerungsort und somit die mögliche Interaktion von Sturzereignissen mit dem Oeschinensee oder einem neu gebildeten Holzspichersee sind von zentraler Bedeutung für die Ausbildung von Folgeprozessen.

5.3 Untersuchte Szenarien

Zusammenfassung der Befunde

Bericht Sekundärprozesse (NDR/Hunziker 2020):

- Das Auftreten und Verhalten der Folgeprozesse (Hochwasser, Murgänge) ist in hohem Masse abhängig von der Gesteinszusammensetzung (Korngrössenspektrum), der Mächtigkeit und der Form der Ablagerungen sowie dem Wassergehalt in den abgestürzten Felsmassen.
- Der Fokus wurde dabei auf diejenigen Szenarien der Sekundärprozesse gelegt, welche unter der Voraussetzung des Eintretens der definierten Sturzzenarien, im Betrachtungszeitraum der nächsten 10 Jahre die grösste Eintretenswahrscheinlichkeit haben.
- Die klassischen Szenarien der Gefahrenkarte wurden nicht separat untersucht.

Beurteilung

Wir haben die Details und Szenarien zu den Sturzprozessen (Primärprozesse) nicht weiter untersucht, erachten sie aber auf der Basis der Erst- und Zweitmeinung sowie der Zusatzuntersuchungen als plausibel. Sie dienen als aktuelle Grundlage für die Herleitung von Szenarien der Sekundärprozesse.

5.4 Bewertung der Wahrscheinlichkeiten

Zusammenfassung der Befunde

aus Bericht NDR/Hunziker (2020) zu den Annahmen zu den Sturzzenarien:

- Die Beurteilung der Sekundärprozesse basieren auf den Sturzzenarien, welche bei der Beurteilung des Primärprozesses in GEOTEST (2019) festgelegt wurden.
- Die ursprünglichen Sturzzenarien wurden im März 2020 zwischen den Erstbearbeitenden der Primär- und Sekundärprozesse besprochen und leicht modifiziert.

- Abbildung 4 in NDR/Hunziker (2020) basiert auf Tabelle 1 in GEOTEST (2019)

	Szenario (SZ)	Beschreibung	Abbruchvolumen
„klein“	1	Teilabstürze von Schuttmateriale aus der W-Flanke	200'000 m ³
	2	Felsauflockerung und -stürze aus dem Gipfelbereich	200'000 m ³
	3	Grosse Schuttrutschungen aus der W-Flanke	600'000 m ³
„mittel“	4	Mehrere grosse Felsstürze aus dem Gipfelbereich	1 Mio. m ³
„gross“	6	Kaskaden- und Dominoeffekte	3 Mio. m ³
	7	Bergsturz mit einem Volumen von mehreren Millionen Kubikmetern Festgestein	8 Mio. m ³
	8	Totalabsturz (tiefliegende Gleitfläche)	20 Mio. m ³
	5	Sturzereignisse im Winterhalbjahr	-

Abbildung 4: Abb.4 aus NDR/Hunziker (2020), basierend auf Tabelle 1 in GEOTEST (2019) und mit neuer Szenariennummerierung. Anpassung bei Szenario 8 mit Erhöhung von 15 auf 20 Mio. m³ und neu ergänztem Szenario 5. Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten der Sturzscenarien fehlen.

Beurteilung

Die Bandbreite der Sturzscenarien und somit die Unsicherheiten bezüglich Sturzvolumen, Ablagerungsart und –ort sind nach wie vor enorm gross. Dies hat zur Folge, dass sich die Unsicherheiten in Bezug auf Folgeprozesse weiter fortpflanzen und tendenziell noch grösser werden. Insgesamt muss festgehalten werden, dass der Kenntnisstand nach wie vor sehr gering ist.

Die Farbgebung der Szenarien 1 bis 8 in Abbildung 4 in NDR/Hunziker (2020) aus GEOTEST (2019) ist nicht beschrieben. Sie stimmt nicht mit der Farbgebung in Abb. 7 NDR/Hunziker (2020) überein (vgl. Kap. 6.3) und ist nicht nachvollziehbar.

Die Anzahl Abbrüche oder Wiederholungen ist nicht ausgewiesen, nur die totalen Abbruchvolumina. Eine Unterteilung in die Prozessformen Felssturz und Bergsturz fehlt.

Es fehlen Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten der Szenarien. Weder im Bericht GEOTEST (2019) noch in der Aktennotiz vom 20.3.2020 finden sich Angaben dazu. Ebenso geht der Bericht CSD/SLF (2020) nicht auf diesen Punkt ein.

Im Gegensatz dazu ist im Bericht CSD/SLF (2020) erwähnt, dass für diese Szenarien die Eintretenswahrscheinlichkeiten gutachterlich und qualitativ abgeschätzt wurden. Sie werden in Kap. 6.2 und 6.3 nochmals aufgegriffen.

5.5 Empfehlung für weiterführende Arbeiten

Sowohl der Wassergehalt (inkl. Eisgehalt) der Ausgangsmasse, welche abstürzen kann, wie auch der Wassergehalt der Sedimente im Ablagerungsbereich und in der unten liegenden Abflussstrecke zum Zeitpunkt des Ereignisses spielen eine wesentliche Rolle bei der resultierenden Gesamtauslaufstrecke der Prozesskette. Wir empfehlen daher, weiterführende Untersuchungen der Materialeigenschaften der potentiellen Sturzmasse und des Materials im Bereich der möglichen Ablagerungsorte vorzunehmen.

Wir gehen davon aus, dass die Auswirkungen eines Sturzes je nach Zeitpunkt im Jahr unterschiedlich ausfallen. So ist etwa bekannt, dass Stürze auf eine Schneedecke eine deutlich längere Auslaufstrecke haben können und sich daraus ebenfalls Folgeprozesse in anderer Form ausbilden können (Abbildung 5). Insofern spielt auch die Saisonalität beim Auftreten eines künftigen Sturzereignisses eine wesentliche Rolle und sollte in die Überlegungen mit einbezogen werden. Zur Veranschaulichung sind Beispiele aus den Alpen und anderen Gebirgsregionen exemplarisch erwähnt und das Fallbeispiel am Nevado Huascarán wird kurz beschrieben.

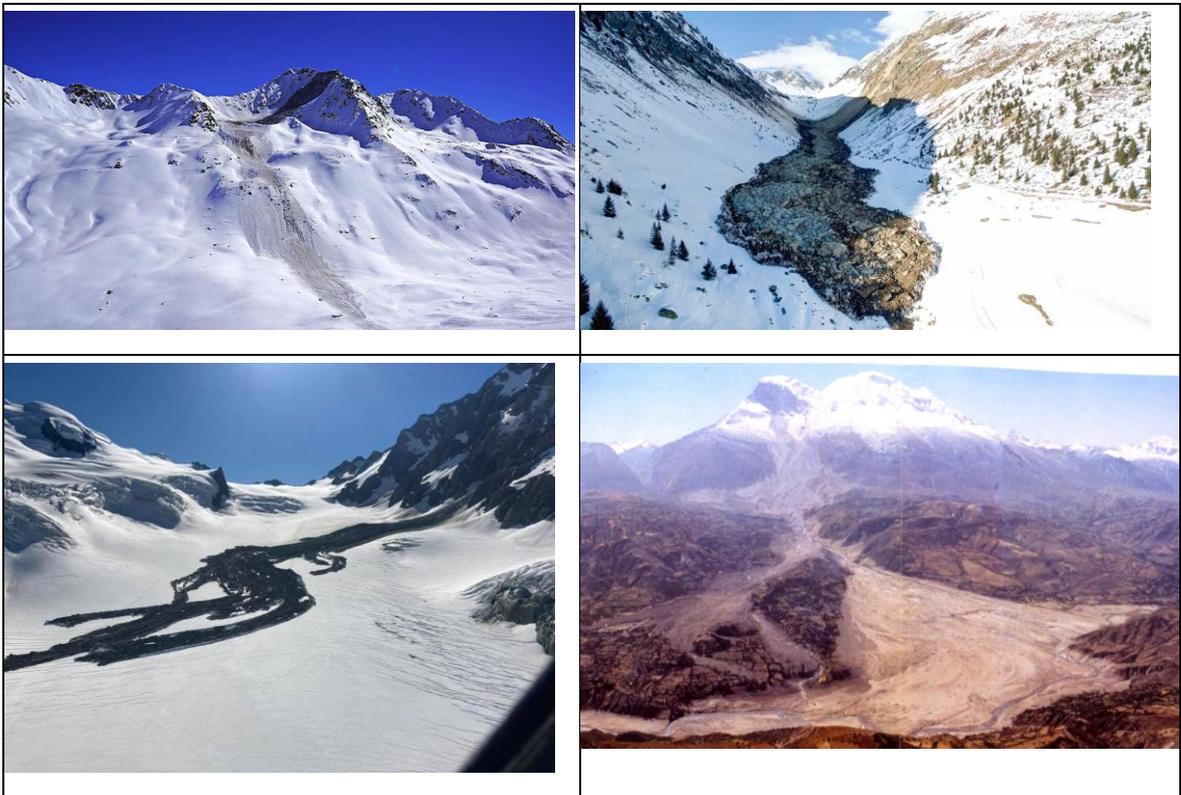


Abbildung 5: Beispiele von Sturzablagerungen auf Schnee oder Eis mit erhöhten Auslaufstrecken. ol: Wisshorn, Safiental 2019 (GR), or: Val Strem, Sedrun 2016 (GR), ul: Mt. Darwin 2021 (NZ), ur: Huascarán 1970 (PE)

Am 31. Mai 1970 ereignete sich nach einem Erdbeben der Stärke 7.8 an der Nordwestflanke des 6655 m hohen Nordgipfels des Nevado Huascarán in Peru ein Bergsturz (Evans et al., 2009). Die Gipfelregion war bereits 1962 als instabil bezeichnet worden, nachdem sich kleinere Abstürze ereignet hatten. Riesige Felsmassen brachen ab und die Massenbewegungen verwandelten sich durch Einbringen von Schnee auf der Oberfläche eines Gletschers unterhalb vom Huascarán und durch die erhebliche Mitnahme von Lockermaterial aus Hängen unterhalb des Gletscherendes in grossvolumige, schlammreiche und schnell fließende Murgänge. Augenzeugenberichte weisen auf sehr hohe mittlere Geschwindigkeiten für die Ereignisse hin; 17–35 m / s (1962) und 50–85 m / s

(1970). Die herabstürzenden Massen begruben die Städte Yungay und Ranrahirca 5 m hoch. Das Ereignis forderte mehrere Tausend Tote. Beide Massenbewegungen setzten sich im Rio Santa stromabwärts als Schlammströme (Aluviones) fort, die 1970 in einer Entfernung von 180 km den Pazifik erreichten. Wasser zur Fluidisierung des mitgerissenen Materials entstand aus dem Schmelzen des eingearbeiteten Schnees und der Freisetzung der in den mitgerissenen Materialien enthaltenen Bodenfeuchtigkeit.

Das Ereignis ist als extrem zu betrachten und liegt im oberen Bereich der im Literaturreview gezeigten Bandbreite (Rickenmann 2021, Fig. 9).

6 Sekundärprozesse im Öschibach

6.1 Geländeinterpretation und Primärprozess

Zusammenfassung der Befunde

Hauptpunkte aus Bericht NDR/Hunziker (2020):

[...]

Die prähistorischen Bergsturzablagerungen, die zum Aufstau des heutigen Oeschinensees geführt haben, weisen einen höheren Anteil an grobblockigem Material auf als bei den künftigen Sturzablagerungen des Spitzens Steis erwartet werden.

Die prähistorischen Bergsturzablagerungen (vgl. Kap. 0 und 5.1) zeigen beide einen sehr hohen Anteil an feinkörnigen Sedimenten. Aufgrund des starken Auflockerungsgrades des Gesteins am Spitzens Stei, muss auch für die sich abzeichnenden Sturzereignisse von feinkörnigen Ablagerungsprodukten ausgegangen werden. Der Blockanteil (Blöcke > 1 m³) dürfte bei kleinen Sturzvolumen eher gering sein.

Ein wesentlicher Teil der prähistorischen Bergsturzablagerungen wurde ausgetragen. Der heutige Sattelpunkt liegt auf 1586 m ü. M., rund 8 m über dem heutigen mittleren Seenniveau. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese obersten 8 m zu einem Teil aus Bachschutt bestehen, welche die Zubringer aus dem Chalberspissgebiet abgelagert haben (grosse Schuttkegel). Der Ausfluss des Oeschinensees durchfließt diese Masse und kommt gut 10 m unter dem heutigen Seespiegel als Quelle an die Oberfläche.

Gemäss den Modellierungen der Felsstürze aus dem Spitzens Stei von GEOTEST (2019) ist ein Ablagerungsprozess möglich, welcher einen relativ flachen Ablagerungskörper in der Sattelzone und talabwärts verursacht. Bei einem relativ trockenen Sturz wäre auch eine Ablagerung möglich, welche einen steileren Damm in der Sattelzone verursachen würde. Die Mächtigkeit der Ablagerung gibt vor, wie stark sich Erosionsprozesse eintiefen können. Bei den Sturzereignissen vom Spitzens Stei werden Ablagerungen von maximal 30 m Mächtigkeit erwartet.

[...]

Beurteilung

Wir stimmen im Wesentlichen mit diesen Einschätzungen überein.

6.2 Hydrologie (Abflussschätzungen / Seeausbruch)

Zusammenfassung der Befunde

aus Bericht NDR/Hunziker (2020):

- Beim Auftreten von Sturzablagerungen im Bereich Oeschinensee Westende - Holzspicher von mehreren Metern Mächtigkeit, kann davon ausgegangen werden, dass die bestehenden unterirdischen Abflusswege zerstört werden. In der feinkörnigen Masse der neuen Bergsturzablagerung findet zudem nur eine geringe Entwässerung statt. Der bestehende unterirdische Abfluss des Oeschinensees wird nicht mehr funktionieren und es kommt zu einem Aufstau von Wasser hinter der Bergsturzablagerung.
- Es wird davon ausgegangen, dass eine Entleerung des Oeschinensees nur bis zum aktuellen Seeniveau von 1578 m ü. M. möglich wäre.
- Die Teileinzugsgebiete des Öschibachs weisen deutlich unterschiedliche Grössen auf. Das grösste Teileinzugsgebiet weist der Oeschinensee mit rund 22 km² auf, was etwa 2/3 des gesamten Einzugsgebietes entspricht. Der Oeschinensee wirkt zudem als Retentionsbecken, so dass bei einem Niederschlagsereignis Hochwasserabflüsse erst verzögert auftreten. Das Einzugsgebiet des Spitze Steis mit dem Chalberspissibach ist rund 20x kleiner und weist eine Grösse von 1.2 km² auf. Entsprechend klein fallen die Hochwasserabflüsse aus.
- Zum Überstau des Oeschinensees (infolge neuer Bergsturzablagerungen) wird für eine Einstauhöhe von 8 bis 34 m eine Fülldauer von 3 bis 12 Monaten abgeschätzt, basierend auf einem Jahresniederschlag von etwa 2000 mm. Dies führt zu einem zusätzlichen Seevolumen von 10 bis 44 Mio. m³, welches ausbrechen und zur Flutwellenbildung führen könnte.
- Für die HQ Schätzung aus dem gesamten Einzugsgebiet des Öschibachs wurden die Werte aus der Gefahrenkarte übernommen. $HQ_{30/100/300} = 19/30/38 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Für die HQ Schätzung aus dem Teileinzugsgebiet Chalberspissibach sowie Staubbach wurden Schätzungen mit der Methode Kölla gemacht: $HQ_{30/100/300} = \text{ca. } 1/2/3 \text{ m}^3/\text{s}$ (pro Bach).

Beurteilung

Wir stimmen im Wesentlichen mit diesen Einschätzungen überein.

Gemäss Kap. 0, Abbildung 2, ergibt sich aus den Daten zu den Seespiegelschwankungen und der Reaktion des Sees auf Niederschläge rechnerisch ein angenähert konstanter Durchfluss $Q = 0.95 \text{ m}^3/\text{s}$ durch den Damm. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein Teil davon im Boden versickert und einen unbekanntem Fliessweg nimmt, und dass der Ausfluss aus dem Damm bei den Quellen in Holzspicher kleiner ist.

Gemäss Messdaten des Flüssigniederschlags der Station Fisistock (Abbildung 3) liegt der mittlere Jahresniederschlag deutlich höher als die in NDR/Hunziker (2020) angenommenen 2000 mm für den mittleren Jahresniederschlag. Durch den rund 2- bis 3-mal höheren Wert relativiert sich die Aussage bezüglich der oben genannten Fülldauer bis zum Überstau des Oeschinensees infolge neuer Bergsturzablagerungen. Es muss tendenziell von einer Verkürzung, bzw. etwa Halbierung der ausgewiesenen Fülldauer ausgegangen werden.

6.3 Untersuchte Szenarien

Zusammenfassung der Befunde

aus Bericht NDR/Hunziker (2020):

A1 bis A4: Flutwellen

- Flutwellen aus dem Oeschinensee oder dem neuem Holzspichersee mit kontinuierlichem Überströmen oder Breschenbildung in der Sturzablagerung.
- Einmaliges Ereignis; wiederholtes Auftreten bei A1 und A2 möglich, jedoch mit sehr kleiner Wahrscheinlichkeit.
- Abhängig von der Grösse des Sturzereignisses

B: Rückschreitende Erosion in der Sturzmasse

- Instabilität in steiler Front
- Durchströmung (Piping)
- Mehrfaches Auftreten möglich, aber wenig wahrscheinlich

E1 bis E3: Gerinneerosion

- Erosion in den mit Felssturzmaterial gefüllten Gerinnen des Chalberspissi- und des Oeschinenbachs
- Wiederkehrende Ereignisse
- Abhängig von der Verfügbarkeit von Lockermaterial im Gerinne

F1 und F2: Schuttstrom

- Übergang Felssturz in Murgang
- F1 = trockene Verhältnisse; F2 = nasse Verhältnisse
- Einmaliges Ereignis, aber eine Wiederholung kann nicht ganz ausgeschlossen werden
- Abhängig von der Grösse des Sturzereignisses und der Verfügbarkeit von Wasser

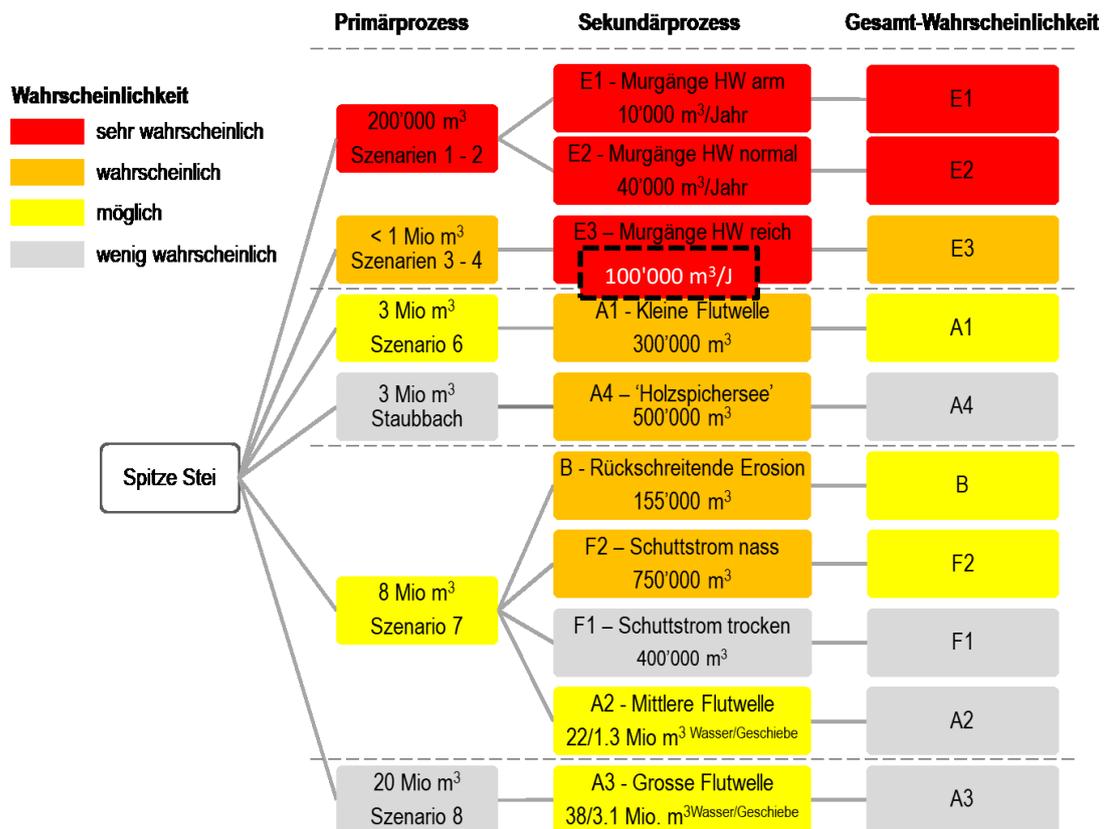


Abbildung 6: Entspricht Abb. 7 aus Bericht NDR/Hunziker (2020) – Die Abbildung enthielt einen Tippfehler, den wir korrigiert haben (Volumen Szenario E3). Die Herleitung der Wahrscheinlichkeiten der Primärprozesse ist unklar. Wir vermuten, dass dies an einer Besprechung zwischen den Bearbeitern der Primär- und Sekundärprozesse festgehalten wurde. Der Punkt wird aber in der Zweitmeinung zu den Primärprozessen nicht weiter ausgeführt.

Beurteilung

Die betrachteten Szenarien scheinen uns grundsätzlich sinnvoll und decken etwa das Spektrum an möglichen Murgangereignisvolumen ab. Eine genauere Abschätzung der zugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten scheint schwierig zu sein.

Eine Plausibilisierung der Murgangvolumen für die Szenarien E1 – E3 fehlt im Bericht Sekundärprozesse. Eine Rückrechnung basierend auf den Angaben zum Abflussvolumen im Bericht Tertiärprozesse (dort: Kap. 5.1, Abb. 2) erlaubt eine Abschätzung des Abflussvolumens für verschiedene Jährlichkeiten (HQ30, 100, 300). Verknüpft man diese Jährlichkeiten mit den Szenarien E1 – E3, ergeben sich Feststoffanteile in der Grössenordnung von 5 – 20%. Eine entsprechende Plausibilisierung eines ausreichenden Wassereintrags fehlt im Bericht. (Gemäss Rückfrage bei den Erstbearbeitern fand hierzu eine Abstimmung zwischen den beiden Bearbeitungsteams statt.)

Die Herleitung der Wahrscheinlichkeiten der Primärprozesse ist unklar. Wir vermuten (vgl. CSD/SLF 2020), dass dies an einer Besprechung zwischen den Bearbeitern der Primär- und Sekundärprozesse festgehalten wurde. Der Punkt wird aber in keinem der Berichte näher behandelt.

Die Szenarien sind mit Buchstaben bezeichnet. In der aufsteigenden Reihenfolge fehlen allerdings Buchstaben (C und D). Gemäss Rückfrage bei den Erstbearbeitenden wurden im Verlauf der Bearbeitung einzelne Szenarien zusammengefasst und die Szenarienbezeichnung dabei nicht nachgeführt.

In diesem Zusammenhang schlagen wir hier eine Bezeichnung für verschieden mobilen Murgangtypen vor, die wir in der Folge im Bericht so verwenden:

- Ein «Schuttstrom» ist unseres Erachtens kein klar definierter Begriff in der wissenschaftlichen Literatur. Man könnte Schuttstrom wie folgt definieren:
Murgangstrom mit eher wenig veränderlichem, anhaltendem Abfluss über längere Zeit und mit potentiell grösserem Volumen ($> 100'000 \text{ m}^3$) aus ausreichend grossem Schuttdepot, z.B. aus einer Bergsturzaablagerung, und evtl. ein nicht besonders grosses Q_{\max} aufweisend. Ein solcher Murgangstrom (Schuttstrom) könnte eine grössere Reichweite haben als das im Bericht ausgewiesene Wirkungsgebiet, z.B. bei fehlendem Abschlussbauwerk im GAP oder bei bereits vollem GAP. Man vergleiche hier auch den Fall Bondasca/Bondo 2017.
- Wenig mobile Murgänge werden als granular und stark mobile Murgänge als schlammstromartig bezeichnet. Diese zwei Zustände sind als Extremwerte in einem weiten möglichen Variationsbereich von unterschiedlichen Mobilitäten anzusehen (vgl. auch den Mobilitätskoeffizienten k_B in Rickenmann 2021). Granulare Murgänge zeigen typischerweise eine korngestützte und schlammstromartige Murgänge eine matrixgestützte Ablagerungsstruktur.

6.4 Murgangentstehung und weitere Feststoffmobilisierung (Erosion entlang des Fliessweges)

Zusammenfassung der Befunde

Gemäss den «Faktenblättern Sekundärprozesse» gehen wir davon aus, dass durch Schätzung einer mittleren Erosionstiefe sowie einer mittleren Erosionsbreite ein mittlerer Erosionsquerschnitt bestimmt wurde. In Kombination mit einer angenommenen Erosionslänge wurde daraus ein Erosionsvolumen abgeschätzt. Dies wurde sowohl für die Erosion in der Sturzaablagerung als auch für die Erosion entlang des Gerinnes des Öschibaches gemacht.

Die Feststoffvolumina für die Flutwellenszenarien A1 – A4 wurden über mögliche Feststoffkonzentrationen (Verhältnis von Feststoff zu Wasservolumen) plausibilisiert.

Beurteilung

Dieses Vorgehen entspricht dem Standardvorgehen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, gemäss den GIUB-Verfahren SEDEX (Frick et al., 2011) bzw. Gertsch (Gertsch, 2009). Ergänzend dazu könnte das RAMMS::Murgang Modell mit Erosionsmodul verwendet werden.

Der Einfluss des Wassergehalts der Murgangmischung könnte einerseits mit dem Modell FLO-2D andererseits evtl. auch mit dem Modell FLUMEN untersucht werden (s. Kommentare in Kap. 0 zum Fall Bondo).

Eine wichtige Frage bei der Murgangentstehung ist z.B., welche Unterszenarien bezüglich Anzahl Schübe und Grösse der Schübe sinnvoll sind, um extreme Varianten des Fliess- und Ablagerungsverhaltens zu untersuchen.

6.5 Abschätzungen wichtiger Fliessparameter mit empirischen Faustformeln

Zusammenfassung der Befunde

Es ist nicht klar, für welche Abschätzungen empirischen Faustformeln verwendet wurden:

- Schätzung $Q_{\max} = f(\text{Murgangfracht})$? [erwähnt in Bericht GEOTEST (2019), p. 18]
- Schätzung Reichweite $L = f(\text{Murgangfracht}, \text{Höhendifferenz})$?
- Schätzung $v = f(Q_{\max}, \text{Gefälle})$?

Mündliche Ausführungen durch M. Zimmermann anlässlich Besprechung II am 10.5.2021:

Für die Schätzung von $Q_{\max} = f(\text{Murgangfracht})$ wurden die klassische Ansätze nach Rickenmann (1999) und Mizuyama (1992) verwendet. Der Ansatz nach Mizuyama (1992) für schlammstromartige Murgänge wurde nicht verwendet. Die Berücksichtigung des Anteils Feinmaterial wurde in Diskussion mit GEOTEST festgelegt. Schlussendlich wurde aus den verschiedenen Ansätzen ein mittlerer Wert bestimmt.

Die Schätzung der Reichweite L erfolgte in Funktion der Murgangfracht und Höhendifferenz. Die Schwierigkeit bestand in der Festlegung, wo (auf welcher Höhenkote) genau der Ablagerungskegel beginnt. Eng geomorphologisch betrachtet liegt ein sehr langer Kegel mit hochgelegenen Kegelhals vor. Unter Verwendung dieser Annahme resultiert aus der Abschätzung eine Reichweite bis zum oberen Kraftwerk (1270 m ü.M.). Als Schlussfolgerung und mittels geomorphologischer Bestimmung wurde die Reichweite bis auf eine Höhe von ca. 1270 bis 1220 m ü.M. festgelegt.

Mit einem Start im Bereich Rinderstutz (1400 bis 1500 m ü.M.) müssen auch Fliesswege auf die orographisch linke Seite erwartet werden. Dies wurde bei den jüngsten Murgangereignissen anfangs August 2018 andeutungsweise auch beobachtet, was auf den potentiellen Ablagerungsort Öschiwald hinwies.

Noch vorhandene Ablagerungspuren historischer Ereignisse im letzten Jahrhundert (vgl. GEOTEST 2016) im oberen Bereich der Siedlung (Waldstück im Bereich des Parkplatzes der Talstation Oeschinen) auf 1180 bis 1200 m ü.M. deuten auf die maximale Reichweite von grösseren Ereignissen hin.

Weitere Spuren von früheren Ereignissen finden sich auf dem gleichmässigen und anthropogen überprägten Kegel kaum mehr: je näher man an das Siedlungsgebiet herankommt, desto seltener sind Spuren vergangener Ereignisse an der Oberfläche infolge der anthropogenen Überprägung.

Beurteilung

Als Beispiel versuchten wir, die Schätzung $Q_{\max} = f(\text{Murgangfracht})$ aus Angaben in einem nachgelieferten Dokument durch die Erstbearbeitenden (Excel Datei zu den Murgangsimulationen mit FLO-2D) nachzuvollziehen. Es ist aber unklar, wann welche Beziehung (bzw. welcher Vorfaktor) verwendet wurde und weshalb dies so erfolgte; zudem belegen die empirischen Daten für eher granulare Murgänge nur eine Beziehung bis zu einer Murgangfracht von ca. 50'000 m³. Es ist daher auch von Bedeutung, wie gross ein maximaler Schub ausfallen könnte.

Die verwendeten Schätzformeln sollten dokumentiert, und die Wahl von Vorfaktoren bei ähnlichen Formeln (wie z.B. für $Q_{\max} = f(\text{Murgangfracht})$) sollte begründet und angegeben werden.

Die Kalibrierung einer 2D-Modellierung gestaltet sich ohne Referenzereignis sehr schwierig. Gemäss Erstbearbeiter stützte man sich auf einige Spuren von Murgangablagerungen ab, welche eher im oberen Kegelbereich vorzufinden sind. Die Abschätzung wichtiger Fließparameter ist in diesem Fall umso anspruchsvoller. Es erscheint uns daher entscheidend, dass die Annahmen bezüglich wichtiger Modellparameter (vgl. auch Kap. 4.3) konkret deklariert werden.

Bei fehlenden Referenzereignissen sehen wir eine mögliche Alternative darin, durch Modellierungen von extremen Mischungen (trocken – nass, granular – schlammstromartig) eine mögliche Bandbreite von Ablagerungsmustern abzudecken. So könnte z.B. ein Mobilitätskoeffizient k_B (Rickenmann 2021) berücksichtigt werden, um schlammstromartige vs. granulare Ereignisse zu charakterisieren.

6.6 Fließ- und Ablagerungsverhalten (Szenarien und Modellierung)

Zusammenfassung der Befunde

- a) Bestimmung Reichweite: Pauschalgefälle-Ansatz und 2-Parameter-Modell von Perla, Cheng und McLung (1980)
- b) Bestimmung Ausbreitung: Flo-2D (DSM Consulting), RAMMS (von GEOTEST durchgeführt) und Flow-R (DSM Consulting)

Die durchgeführten Modellierungen wurden von den Erstbearbeitenden nachgeliefert (Excel-Datei). Das Dokument beinhaltet eine tabellarische Zusammenstellung der modellierten Fälle und Abbildungen zu Simulationsresultaten. Diese zeigen nur die maximalen Abflusstiefen an (vgl. Abbildung 7).

Aus Angaben in der Excel Datei zu den Murgangsimulationen mit FLO-2D geht hervor, dass pro Szenario mit einem gegebenen Bereich an Ereignisgrösse nur relativ wenige mögliche Murgangganglinien (bzgl. konkreter Ereignisgrösse, Anzahl Schübe, Maximalabfluss) modelliert wurden. Eine Aufdatierung der Topographie erfolgte dabei nur in einem «Fall». Weitere Ausführungen fehlen.

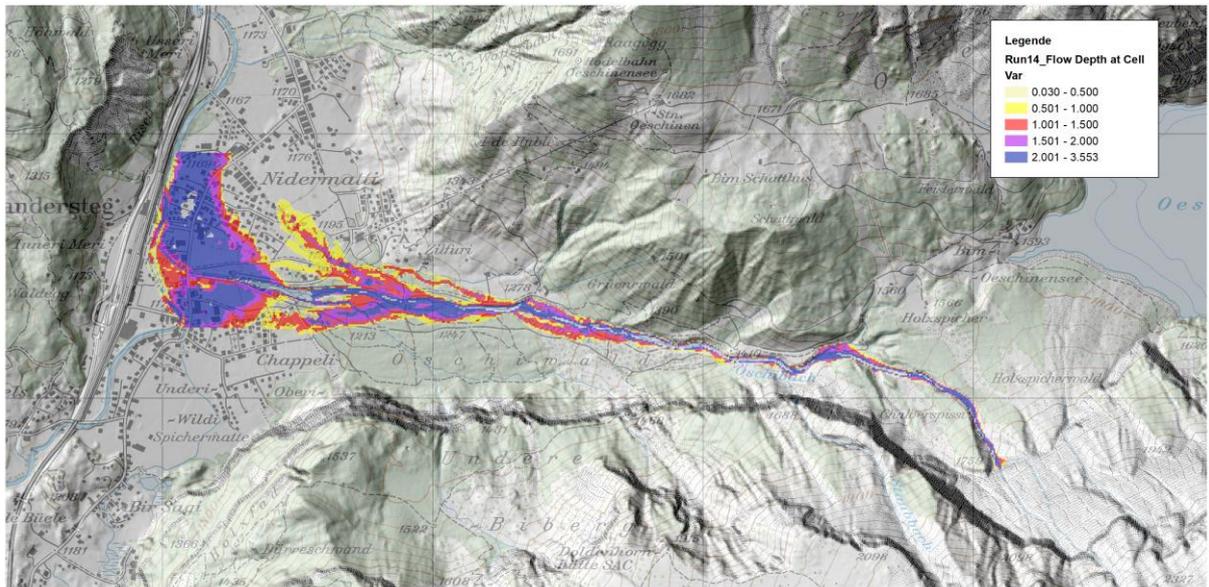


Abbildung 7: Simulationsresultat: (Max.) Abflusstiefen einer Flow-2D Modellierung von DSM für einen mittleren, nassen Murgang von 40'000 m³ auf einer Topographie mit 6 x 6 m Gittergrösse.

Schriftliche Präzisierung von Gabi Hunziker:

«Betreffend Modellierungsgrundlagen liegen keine Berichte vor. Die Modellierungen haben wir als eines von mehreren Arbeitsinstrumenten eingesetzt, mit dem Ziel unsere Abschätzungen mit einer Modellrechnung kritisch zu überprüfen. Sie bilden nicht die Grundlage für die Abgrenzung der Prozessflächen und wurden daher auch nicht in den Bericht integriert. Ziel der Modellierungen war, unsere gutachterlichen Festlegungen der Prozessflächen und der möglichen Ausbruchstellen aus dem Gerinne, mit Modellresultaten zu überprüfen.»

Gemäss Szenario F1 gelangt ein Schuttstrom in der Grössenordnung von 400'000 m³ etwa in den Bereich von Chappeli, und erst ein Schuttstrom in der Grössenordnung von 750'000 m³ gemäss Szenario F2 gelangt bis zur Kandermündung.

Die damalige Situation mit in Planung befindlichen Dämmen konnte nur sehr bedingt berücksichtigt werden. Die damals angenommene Lage der Dämme stimmt mehrheitlich mit dem realisierten Zustand überein. Gemäss Aussage der Erstbearbeiter wurde für die FLO-2D Simulationen eine konstante Dammhöhe von 3m berücksichtigt, was nicht dem später realisierten Zustand entspricht. Bei den Simulationen wurde kein Abschlussbauwerk berücksichtigt.

Beurteilung

Grundannahmen zu den Modellierungen und ein Vergleich von Modellresultaten fehlen in der Erstbearbeitung. Die durchgeführten Modellierungen wurden offenbar mehr qualitativ in die Beurteilung der Prozesse miteinbezogen.

Zu den eingesetzten Modellen möchten wir aufgrund des Literaturreviews (Rickenmann 2021) folgende allgemeine Kommentare anbringen (vgl. auch Kap. 4.3):

zu (a): Die Modellierung mit dem 2-Parameter-Modell ist sehr stark abhängig von der Annahme des Wertes für den Parameter μ im Perla et.al.-Modell.

zu (b) Die Resultate bezüglich der Reichweite sind sehr stark abhängig von der Annahme zum Parameter μ in RAMMS sowie in Flow-R, und von der Annahme zum Parameter τ -B in Flo-2D. Gemäss den Unterlagen (Excel Datei) ist anzunehmen, dass für einen sehr grossen Schub (bis zu 750'000 m³) nur eine einzige Simulation gemacht und nicht mehrere Schübe (mit Aufdatierung der Topographie) simuliert wurden.

Zudem fällt auf, dass die FLO-2D-Simulationen mit relativ grober Maschenaufösung gerechnet wurden (von 6 x 6 bis 15 x 15 m). Dabei werden die topographischen Effekte nur ungenau berücksichtigt. Aus unserer Erfahrung spielt die Berücksichtigung der Topographie eine wesentliche Rolle. So ist z.B. der Gerinnebereich nur dann einigermaßen zuverlässig abgebildet, wenn mindestens drei Punkte innerhalb eines Gerinnequerschnittes liegen.

Wir meinen, dass generell pro Szenario (mit einem gegebenen Bereich an Ereignisgrösse) zu wenige Kombinationen an möglichen Murgangganglinien (bzgl. konkreter Ereignisgrösse, Anzahl Schübe, Maximalabfluss) modelliert wurden. Für den Fall mehrerer Schübe hätte zudem die Topographie aufdatiert werden müssen. Auch wenn bezgl. der Reibungsparameter Unsicherheiten bestehen, erlauben detailliertere Modellierungen immerhin, das Spektrum des möglichen Fliess- und Ablagerungsverhaltens in kritischen Zonen quantitativ genauer zu beurteilen.

Wie der Fall Pizzo Cengalo, aber auch andere Fälle gezeigt haben, können mehrere Murgangereignisse nahe aufeinander folgen. Beim Pizzo Cengalo kam es innerhalb von 8.5 Tagen zu ca. 15 Murgängen aus dem Bergsturzmaterial, die meisten davon ohne Mitwirkung von Niederschlägen (Walter et al., 2020). Die Ablagerungen der einzelnen Murgänge beeinflussen dabei die darauffolgenden Murgänge, was in der Modellierung berücksichtigt werden kann.

Bezüglich der beiden Szenarien F zum «Schuttstrom» sind wir anderer Meinung als die Erstbearbeitenden. Wir kommen zum Schluss, dass ein Schuttstrom in der Grössenordnung von 300'000 m³ durchaus die Kander erreichen könnte. Dazu haben wir folgende Überlegungen gemacht, unter Berücksichtigung der Reichweitenformeln gemäss Kap. 4.3, Punkt E:

- In der Bondasca erreichte ein Schuttstrom von ca. 100'000 m³ bis 150'000 m³, mit angenommenem Startpunkt in Laretto (1400 m ü.M.), die Mündung in die Maira (800 m ü.M.); dies ergibt eine Höhendifferenz $H = 600$ m und eine Reichweite $L = 3700$ m. Gemäss den Formeln (4-6) bzw. (4-7) in Rickenmann (2014) ist diese Reichweite realistisch, wenn der Vorfaktor beim Potenzgesetz um 50% auf 2.85 erhöht wird gegenüber dem mittleren Trend (mit Vorfaktor 1.9); dies liegt durchaus im Bereich der Streuung der Daten.
- Im Öschibach führen wir eine ähnliche Abschätzung durch, mit angenommenem Startpunkt in Holzspicher (1570 m ü.M.) und einem Fliessen bis zur Mündung in die Kander (1170 m ü.M.); dies ergibt eine Höhendifferenz $H = 400$ m und eine Reichweite $L = 3050$ m. Berechnet man nun mit einem Vorfaktor von 2.85 beim Potenzgesetz das benötigte Volumen für diese Reichweite, erhält man einen Wert von etwa 250'000 m³ bis 300'000 m³. Diese einfache Abschätzung würde grundsätzlich auch auf das Szenario A1 (kleine Flutwelle) zutreffen, d.h. dass auch in diesem Fall ein Murgang («Schuttstrom» oder Schlammstrom) bis in die Kander gelangen könnte.
(Bezüglich möglicher Auswirkungen eines Szenarios «Schuttstrom bis in die Kander» auf die Tertiärprozesse siehe auch Kap. 7.5 weiter unten.)

Weitere Beispiele von Schuttstromereignissen in der Schweiz mit grossen Volumina sind der Illgraben (VS) und das Valparghera (GR). Dabei ist zwar zu bemerken, dass die Kegelgefälle im unteren Bereich des Illgraben und des Valparghera grösser sind als im unteren Teil des Öschibachs, aber im unteren Bereich der Bondasca liegt das Gefälle in einem ähnlichen Bereich, wie jenes im unteren Bereich des GAP in Kandersteg. Zusätzliche Beispiele wären Fully (VS), Durnagelbach (GL) und In den Arelen (GR).

Bezüglich der Szenarien Schuttstrom F1 und F2 fällt auf, dass das in den Faktenblättern dargestellte generelle Ablagerungsmuster (S. 38 F1 und S. 41 F2, je Situation mit Dämmen) hinterfragt werden kann; für die heutige und geplante Situation mit Dämmen und Abschlussbauwerk sollten die möglichen Ablagerungsmuster genauer untersucht werden (vgl. Kap. 9).

6.7 Bewertung der Wahrscheinlichkeiten

Zusammenfassung der Befunde

Abbildung 7 in NDR/Hunziker (2020) weist eine Beurteilung der Eintretenswahrscheinlichkeiten als Kombination der Eintretenswahrscheinlichkeit des Primärprozesses und des Sekundärprozesses aus. Im Folgenden werden alle genannten Eintretenswahrscheinlichkeiten auf den Sekundärprozess bezogen.

Für die Szenarien A ergeben sich die folgenden Überlegungen: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein natürlicher Damm tatsächlich bricht, beträgt gemäss weltweiter Datensammlung etwa 33 – 50 % (basierend auf einer Vielzahl von aufgetretenen Ereignissen). Daraus resultiert eine Einstufung als wahrscheinlich (A1 und A4), ausser beim Szenario A2, welches auf einem grossen Bergsturz von 8 Mio. m³ basiert und dem Szenario A3, welches vom maximal möglichen Bergsturz von 20 Mio. m³ ausgeht. Beide werden nur als möglich beurteilt.

Das B-Szenario wird als wahrscheinlich eingestuft.

Die Szenarien E werden alle als sehr wahrscheinlich ausgewiesen. Dies hängt bei E1 und E2 mit den ebenfalls als sehr wahrscheinlich eingestuften Szenarien 1 und 2 für den Primärprozess zusammen. Bei E3 wird der als wahrscheinlich eingestufte Primärprozess 3 und 4 (Volumen < 1 Mio. m³) der Sekundärprozess wie bei E1 und E2 als sehr wahrscheinlich ausgewiesen.

Die beiden F-Szenarien unterscheiden sich bezüglich Wassergehalt. Ein nasser Schuttstrom wird als wahrscheinlich, ein trockener Schuttstrom als wenig wahrscheinlich eingestuft.

Beurteilung

Bei den Szenarien A, B, E und F betrachten wir die halbquantitativen Einschätzungen der Wahrscheinlichkeiten als plausibel. Genauere quantitativen Einschätzungen sind mit dem jetzigen Kenntnisstand der Prozesse kaum möglich.

6.8 Empfehlungen zu Massnahmen

Zusammenfassung der Befunde

Da zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichtes NDR/Hunziker (2020) die Realisierung von (ersten) Massnahmen erst begonnen hatte und die Diskussion der Massnahmenplanung im Gange war, wird dieses Thema in Kap. 9 ausführlicher diskutiert.

aus NDR/Hunziker (2020):

Bauliche Schutzmassnahmen:

- Regelmässiges Freihalten des GAP.
- Erstellung eines Blockriegels im Abschluss des GAP.
- Endausbau des GAP mit einem Querbauwerk mit definierter Überfallkote auf 1188 m ü.M.
- Der GAP, das Gerinne im Abschnitt zwischen GAP und Kander sowie der Mündungsbereich sollen nach Ereignissen durch Baggerung freigehalten werden.
- Die Bedingungen im Ablagerungsgebiet der Stürze und im Gerinnebereich bis zum GAP sollen ereignisbezogen dokumentiert werden.
- Der Schutzdamm im Öschwald weist idealerweise eine Höhe von 4 m auf. Damit er für die Szenarien E wirksam ist, ist eine Mindesthöhe von 3 m Höhe erforderlich [...] Am unteren Endpunkt des Dammes muss eine Höhe von 1.5 m eingehalten werden, gleiche Höhe wie gegenüberliegender Damm. Der Damm muss dem Anprall eines Murgangschubes von etwa 2 m Höhe und einer Geschwindigkeit von 2-3 m/s widerstehen können. Der Dammfuss ist zu sichern.
- Der Schutzdamm im Zilfuri weist idealerweise eine Höhe von 5 m auf. Damit er für die Szenarien E wirksam ist, ist eine Mindesthöhe von 3 m erforderlich. [...] Am unteren Endpunkt des Dammes muss eine Höhe von 1.5 m eingehalten werden, gleiche Höhe wie gegenüberliegender Damm. Der Damm muss dem Anprall eines Murgangschubes von etwa 2 m Höhe und einer Geschwindigkeit von 3-4 m/s widerstehen können. Die wasserseitige Böschung ist mit Blöcken oder allenfalls Baumstämmen bis auf die halbe Höhe zu sichern. Wasserseitig sollte vor dem Dammfuss eine Abflussrinne bestehen.
- Der Damm im Öschwald sollte in den Jahren 2021 und 2022 auf mindestens 4 m erhöht werden, jener im Zilfuri auf mindestens 5 m, so dass die Dämme für die Szenarien B und F die ihnen zgedachte Wirkung erzielen können. Dadurch erhöht sich auch die Sicherheit für die Szenarien E. Eine weitere Erhöhung der Dämme (v.a. Öschwald) auf 6 m muss erst dann ins Auge gefasst werden, wenn das umliegende Terrain durch Ablagerungen relevant erhöht wurde.

Notfallmassnahmen:

- Technische Massnahmen, insbesondere beim Primärprozess sind limitiert. Entsprechend wichtig ist es, die Sicherheit der Bevölkerung mit organisatorischen Massnahmen zu verbessern. Dazu sind rechtzeitig Notfallmassnahmen zu planen.
- Bezüglich Notfallmassnahmen stellen die Szenarien, welche von einem Aufstau des Oeschinensees ausgehen (Szenarien A1 - A4), einen speziellen Fall dar.
- Kontinuierliches Beobachten und Messen des Pegels im Oeschinensee und der Abflussverhältnisse / Quellen in der Sturzablagerung (Monitoring)

- Prüfen der Installation von Pumpen um allenfalls den Pegelanstieg zu verlangsamen/verhindern oder prüfen des Grabens eines Entlastungsgerinnes in der Sturzablagung. Die Evaluation möglicher Entlastungsmassnahmen sollte zeitnah erfolgen und nicht erst im Ereignisfall
- Information der GFO/RFO im Kandertal.
- Beurteilen der durch eine Flutwelle ausgelösten Gefahrenprozesse und Kartieren der potentiellen Überflutungsflächen im Kandertal.
- Prüfen der allenfalls zu evakuierenden Personen im Gefahrengebiet.

Planungszonen:

- Wirkungsflächen und die Einstufung der Eintretenswahrscheinlichkeiten dienen als Grundlage für das Ausscheiden von Planungszonen.
- Es werden die folgenden Gebiete ausgeschieden:
 - Gebiete, welche mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeitsklasse 'sehr wahrscheinlich') von hoher und mittlerer Intensität betroffen sind (Szenarien E1, E2)
 - Gebiete, welche wahrscheinlich (Wahrscheinlichkeitsklasse 'wahrscheinlich') von hoher und mittlerer Intensität (mit violetter und dunkel-violetter Farbe) betroffen sind (Szenario E3)
 - Gebiete, welche möglicherweise (Wahrscheinlichkeitsklasse 'möglich') von hoher und mittlerer Intensität (mit violetter und dunkel-violetter Farbe) betroffen sind (Szenarien B, F2)
 - Gebiete, welche möglicherweise von hoher und mittlerer Intensität (mit violetter und dunkel-violetter Farbe) betroffen sind, wo jedoch mit Massnahmen die Eintretenswahrscheinlichkeit deutlich reduziert werden kann (Szenario A1). Diese Gebiete sollten nicht mit einer Planungszone belegt werden.
 - Gebiete, welche zwar gefährdet sind, deren Eintretenswahrscheinlichkeit jedoch sehr klein ist (Szenarien F1, A2, A3, A4). Diese Gebiete sollten nicht mit einer Planungszone belegt werden.
- Die Angaben der Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf die Gesamtwahrscheinlichkeit (vgl. dort: Abbildung 7)

Beurteilung

Wir stimmen mit den vorgeschlagenen Massnahmen im Wesentlichen überein und betonen die Wichtigkeit einer umfassenden und strukturieren Dokumentation der zukünftigen Ereignisse, um ein detaillierteres Verständnis der Prozessabläufe zu erhalten. Wir unterstützen insbesondere auch ein umfassendes Monitoring der Murgangaktivität im Öschibach, z.B. mit Geophonsensoren und Videocameras und bei grösseren Ereignissen. Zusätzliche Angaben sollen mit einer standardisierten Ereignisdokumentation inkl. Kartierung der Ausdehnung, Ablagerungsmächtigkeit, Kornzusammensetzung, etc. erfasst werden (vgl. Emch+Berger 2018). Dazu gehört auch eine regelmässige Volumenbilanzierung mittels (drohnenbasierter) Vermessung des gesamten Ablagerungsperimeters zwischen Oeschinensee und Kandersteg.

Der angedachte Ausbau der Dämme und des GAP in den Jahren 2021 und 2022 sind beschrieben und in Bezug zu den Szenarien gesetzt. Das grundsätzliche Konzept mit den beiden Dämmen und dem GAP zum Rückhalt von Geschiebe beurteilen wir als sinnvoll. Die baulichen Schutzmassnahmen

sind unter den gegebenen Umständen und Platzverhältnissen in ihrer Lage und in ihrem Verlauf gut gewählt.

Die in NDR/Hunziker (2020) ausgewiesene Belastung im Falle einer feststoffbelasteten Flutwellenfront (evtl. ähnlich einer Murgangfront) am Ende des Zilfuridamms ($h = 2 \text{ m}$, $v = 3 - 4 \text{ m/s}$) halten wir für fraglich oder zu tief, was bei der Gestaltung eines Abschlussbauwerkes berücksichtigt werden muss (vgl. Kap. 9).

Eine mögliche Unterstützung der Bewirtschaftung des Ablagerungsraumes Öschwald könnte evtl. durch geeignete Ablenkmassnahmen oder vordefinierte Fließwege (u.a. durch lokale Erdverschiebungen) erreicht werden, was detaillierte Modellierungen des Ablagerungsverhaltens im GAP erfordern würde (vgl. Kap. 9).

Wir erachten die aufgeführten Notfallmassnahmen, insbesondere für die A-Szenarien als zielführend.

Die Herleitung von Wirkungsgebieten und Planungszonen und deren Einteilung erscheint uns grundsätzlich plausibel. Wir meinen gleichzeitig, dass das Fließ- und Ablagerungsverhalten vorgängig genauer untersucht werden sollte.

Der Murgang als Sekundärprozess erreicht in etwa die Ausdehnung, welche in der Gefahrenkarte Wasser als Zone mit mittlerer Gefährdung ausgeschieden wurde. Diese Ausdehnung wird aufgrund des grossen Lockermaterialangebots allerdings bereits bei deutlich häufigeren Gewitterereignissen erreicht, als dies in der Gefahrenkarte berücksichtigt wurde.

7 Tertiärprozesse in der Kander

7.1 Situation nach Sekundärprozessen

Zusammenfassung der Befunde

Folgende Sekundärprozesse wurden in der Erstbeurteilung aus NDR/Hunziker (2020) übernommen: Szenario A: Flutwelle aus Oeschinensee; Szenario B: Rückschreitende Erosion Sturzmasse; Szenario E: Gerinneprozesse durch Hochwasser; Szenario F: Schuttstrom.

Die Resultate aus der Studie der Sekundärprozesse zeigen, dass mit grossen Ablagerungen im Unterlauf vom Öschibach und teilweise auch in der Kander zu rechnen ist. Diese Ablagerungen führen im Unterlauf vom Öschibach zu Veränderungen der Geometrie, des Feststoffpotenzials und dessen Zusammensetzung. Hochwasserereignisse, welche nach den Sekundärprozessen auftreten können (Tertiärprozesse), führen zu Wasseraustritten oder einer Mobilisierung des neu vorhandenen Materials.

Beurteilung

Wir stimmen mit der generellen Beurteilung der erwarteten Einflüsse der Sekundärprozesse auf die Tertiärprozesse überein.

Aus unserer Sicht ist einzig das Szenario, dass ein «Schuttstrom» bis in die Kander gelangt, in der Erstbeurteilung zu wenig beachtet worden (s. auch Kommentar in Kap. 6.6 sowie weiter unten in Kap. 7.5 und 7.6).

7.2 Hydrologie

Zusammenfassung der Befunde

Die Spitzenabflüsse der Hochwasserszenarien HQ30, HQ100 und HQ300 im Öschibach bei der Mündung in die Kander wurden der Gefahrenkarte Kandersteg entnommen: 19, 30, 38 m³/s. Im Zuge der Geschiebestudie Öschibach [1] wurden diese Abflüsse überprüft und als eher hoch, aber plausibel beurteilt. Für die Ganglinie wurde eine vereinfachte Dreiecksganglinie mit steilem Anstieg des Abflusses und einem flacheren absteigenden Ast verwendet. Die geschätzten Ereignisdauern für die drei Szenarien betragen von 4 h bis 7.5 h.

Die Spitzenabflüsse der Hochwasserszenarien HQ30, HQ100 und HQ300 in der Kander wurden aus der Studie «LLE» entnommen: 56, 70, 86 m³/s. Relevant für den Geschiebetransport an der Kander ist ein Abfluss von über 10 m³/s. Die geschätzten Ereignisdauern für Abflüsse darüber betragen 50 h oder mehr.

Eine Sensitivitätsanalyse zum Geschiebetransport vom Öschibach in die Kander wurde in der «Geschiebestudie Öschibach (HZP 2019)» gemacht. Bzgl. Hydrologie wurde der Einfluss der Ereignisdauer aber nicht des Spitzenabflusses untersucht.

Beurteilung

Die Betrachtungen zur Hydrologie in den Einzugsgebieten des Öschibachs und der Kander erscheinen uns grundsätzlich plausibel. Die aus Tab. 3 in HZP (2020) abgeschätzten spezifischen Spitzenabflüsse von HQ30 – EHQ bezogen auf die Einzugsgebiete von Kalberspiessibach und Staubbach ($9 - 24 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) scheinen uns plausibel.

Mögliche Unsicherheiten bzgl. der Hydrologie sind in HZP (2020) nicht diskutiert. Es wäre sinnvoll, die Resultate der Sensitivitätsanalyse im Bericht zu den Tertiärprozessen zusammenzufassen. Zudem könnte für die Abschätzung der Geschiebemobilisierung und -einträge in die Kander evaluiert werden, wie stark sich Unsicherheiten bei der Hydrologie im Vergleich zu Unsicherheiten bei der Transportberechnung auswirken.

Die Studie «LLE» wird im Bericht HZP (2020) nicht zitiert und LLE als «lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse» nicht benannt.

7.3 Geschiebemobilisierung und -einträge

Zusammenfassung der Befunde

Die Berechnung der Geschiebetransportkapazität im Öschibach erfolgte nach Smart und Jäggi (1983) mit einem Einkornmodell. Im heutigen Zustand hat die transportlimitierende Strecke ein Gefälle von 3.3 % und begrenzt den Geschiebeeintrag in die Kander. Die Transportkapazitäten für das Geschiebe vom Öschibach in die Kander während der Hochwasserereignisse für die H30 bis HQ300 betragen ca. 1000 bis 5000 m^3 pro Ereignis.

Die Berechnung der Schwebstoff-Transportkapazität im Öschibach erfolgte nach Einstein (1950). Die Transportkapazitäten für die Schwebstoffe vom Öschibach in die Kander während der Hochwasserereignisse für die drei erwähnten Szenarien betragen ca. von 10'000 bis 70'000 m^3 pro Ereignis.

Im heutigen Zustand wirkt der Gerinneabschnitt 3 (Oe3) vom Öschibach durch seine grosse Breite als transportlimitierende Strecke und begrenzt so den Geschiebeeintrag in die Kander. In Zukunft wird davon ausgegangen, dass der Öschibach eine Rinne in die Ablagerungen der Sekundärprozesse erodieren wird und daher die Transportkapazität des Abschnittes 2 (Oe2) massgebend sein wird für den Geschiebetransport. [Reduktion der Breite von 16 auf 4m, leicht grösseres Gefälle.] Die Transportkapazitäten für das Geschiebe vom Öschibach in die Kander während der Hochwasserereignisse für die H30 bis HQ300 betragen dann ca. 2000 bis 7000 m^3 pro Ereignis.

Eine Sensitivitätsanalyse zum Geschiebetransport vom Öschibach in die Kander wurde in der «Geschiebestudie Öschibach (HZP 2019) » gemacht. Bzgl. Geschiebetransport wurde der Einfluss der Breite, des Gefälles und des Korndurchmessers untersucht.

Der Eintrag von Feinmaterial wurde mittels Schwebstofftransportformel nach Einstein (1950) bzw. Malcherek (undatiert, Univ. München) berechnet.

Beurteilung

Mögliche Unsicherheiten bzgl. der abgeschätzten Geschiebeeinträge vom Öschibach in die Kander sind in HZP (2020) nicht diskutiert. Es wäre sinnvoll, die Resultate der Sensitivitätsanalyse im Bericht zu den Tertiärprozessen zusammenzufassen. Zudem könnte für die Abschätzung der Geschiebemobilisierung und -einträge in die Kander evaluiert werden, wie stark sich Unsicherheiten bei der Hydrologie im Vergleich zu Unsicherheiten bei der Transport-berechnung auswirken.

Falls durch die neue Murgangssituation und die dadurch entstehenden Geschiebeeinträge auf den Kegel mit viel Feinmaterial gerechnet wird, wäre evtl. auch die Anwendung eines Mehrkorn-Transportmodells sinnvoll.

Es ist nicht klar, wie genau der Transport von Feinmaterial nach Einstein (1950) berechnet wurde (s. auch Kap. 7.6).

Das Verhältnis von Geschiebe- zu Schwebstofftransport ist grundsätzlich sehr variabel für ein gegebenes Gerinne (Turowski et al. 2010). Auch wenn die Grössenordnung dieses in HZP (2020) bestimmten Verhältnisses plausibel scheint, wäre eine Diskussion der Unsicherheiten der Abschätzung beider Feststoffeinträge in die Kander sinnvoll.

7.4 Aktuelle Hochwassersicherheit der Kander

Zusammenfassung der Befunde

- Es wurden verschiedene Hochwasserkombinationen an der Kander und am Öschibach im 1D-Geschiebemodell gerechnet und zusätzlich das Feinmaterial berücksichtigt. Die Hochwasserspitze vom Öschibach tritt dabei jeweils vor der Spitze der Kander auf. Der Geschiebeeintrag aus dem Öschibach wird soweit erhöht, bis die Kapazität der Kander nicht mehr ausreicht und das Wasser über die Ufer tritt. Der Geschiebeeintrag aus der Kander wird ebenfalls berücksichtigt und entspricht der Transportkapazität oberhalb der Öschibachmündung.
- Die Modellierungen haben gezeigt, dass im heutigen Zustand – trotz einer erhöhten Sohlage im Mündungsbereich vom Öschibach – weiterhin ein Hochwasserereignis der Kander bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren abgeführt werden kann.

Beurteilung

Wir schätzen die Beurteilung als plausibel ein. (Siehe aber auch Kap. 7.6, Kommentar zu Mormo «Plausibilisierung».)

7.5 Geschiebeeinträge vom Öschibach in die Kander für verschiedene Szenarienkombinationen

Zusammenfassung der Befunde

- Die Szenarien A der Sekundärprozesse (Flutwellen) werden für diese Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt. Das Kandergerinne wird bei diesen Szenarien vollständig verfüllt und die Hochwassersicherheit ist bereits nach dem Sekundärprozess nicht mehr gegeben, wodurch die geschiebetechnische Untersuchung des Tertiärprozesses keine zusätzlichen Erkenntnisse liefert.
- Für die restlichen sechs Sekundärprozesse der Szenarien B, E, F wurden nach Absprache mit den Erstbearbeitenden der Studie Sekundärprozesse Szenarien der Tertiärprozesse definiert. Dazu wurden bewusst Szenarien mit einer eher tiefen Jährlichkeit gewählt: Qm bis HQ5 in der Kander, HQ2 bis HQ30 im Öschibach; es wurden sechs Szenarien untersucht. Nach dem Eintreten der Sekundärprozesse besteht je nach Szenario die Möglichkeit, dass das heutige Gerinne des Öschibachs komplett verfüllt wird und der Bach austritt oder ein neues Gerinne bildet. Dieser Zustand wurde aufgrund der geringeren mobilisierten Frachten geschiebetechnisch nicht untersucht, ein Austritt des Öschibachs aus seinem Unterlauf ist allerdings in den ausgeschiedenen Überflutungsflächen berücksichtigt. Bei diesen sechs Szenarien beträgt der Sedimenteintrag vom Öschibach in die Kander zwischen 60 und 2000 m³ pro Ereignis für das Geschiebe und zwischen 100 und 10'000 m³ pro Ereignis für die Schwebstoffe.
- Bei der Betrachtung der Szenarienkombinationen Sekundär- und Tertiärprozesse wurde in der Regel angenommen, dass sich das Geschiebe aus den Sekundärprozessen auf dem Kegel (bzw. GAP) ablagert und dann durch Hochwasser im Öschibach (HQ2 bis HQ100) in die Kander transportiert wird. Für das Szenario F1 der Sekundärprozesse (Schuttstrom mit 400'000 m³) wurde angenommen, dass davon die Kander «nicht direkt betroffen» ist [dort: Tab. 9, S. 15].
- Gemäss den Tertiärprozessen T1 bis T5.2 wird Sediment nur durch Hochwasser im Öschibach (HQ2 bis HQ30) in die Kander transportiert, wobei der Eintrag aus Geschiebe und Feinmaterial maximal 12'000 m³ beträgt. Aufgrund dieser Einträge ergibt sich eine gewisse Auflandung in der Kander, mit erhöhten Überflutungswahrscheinlichkeiten im Umland als Folge davon.

Beurteilung

Wir halten es für fraglich, ob vor allem bei den Flutwellenszenarien A1 und A4 das Kandergerinne vollständig verfüllt wird. Wir gehen eher davon aus, dass der Gerinneabschnitt zwischen Abschlussbauwerk des GAP und Kandermundung relativ schnell verstopfen und dadurch ein grosser Teil des Geschiebes auf dem Kegel abgelagert wird.

Wir sind bzgl. Punkten 3 und 4 oben anderer Meinung. Wir kommen zum Schluss, dass ein Schuttstrom in der Grössenordnung von 300'000 m³ durchaus die Kander erreichen könnte. Diese Aussage basiert auf der Anwendung einer empirischen Reichweiteformel sowie auf einer Analogie zum Fall Bondasca/Bondo von 2017 (siehe dazu auch Kap. 6.6 sowie Kap. 4.3, Punkt E).

Die übrigen Einschätzungen halten wir für plausibel.

Qm wird im Bericht HZP (2020) nicht definiert. Wir vermuten, dass damit der mittlere Jahresabfluss (in der Kander) gemeint ist. Die Abkürzung mQ wird nur einmal in Tab. 8 verwendet und dürfte ebenfalls den mittleren Jahresabfluss meinen.

Der Begriff Feinmaterial wird im Bericht HZP (2020) synonym zu Schwebstoff verwendet, jedoch ist dies nicht explizit erklärt.

7.6 Geschiebmodellierung Kander für verschiedene Szenarienkombinationen

Zusammenfassung der Befunde

- Sobald auch der Öschibach Hochwasser führt und wesentliche Geschiebemengen in die Kander einträgt, kommt es zu einer Überlastung im Kandergerinne. Ab einem Ablagerungsvolumen von 2'500 m³ (Summe an Feststoffen) wäre das Kandergerinne vollständig verfüllt.
- Für die aktuelle Situation wurden acht Szenarienkombinationen für unterschiedliche Abflüsse im Öschibach und in Kander untersucht. Wenn man auch das Feinmaterial berücksichtigt, sind ab einem HQ100-Ereignis im Öschibach Wasseraustritte aus der Kander zu erwarten, unabhängig vom Abflussszenario in der Kander.
- Für die zukünftige Situation wurden sechs Szenarienkombinationen für unterschiedliche Abflüsse im Öschibach und in Kander untersucht. Aus den Resultaten lässt sich herleiten, dass Hochwasserereignisse aus dem Öschibach, im Nachgang von Sekundärprozessen, ab einer Jährlichkeit von 10 Jahren oder mehr die Kander im Mündungsbereich vollständig verfüllen. Dabei spielt das Szenario beim Sekundärprozess keine Rolle, das mobilisierbare Feststoffpotential ist immer gegeben. Auch hat die Teilverfüllung der Kander im Oberlauf bei den Szenarien E3 und F2 (Sekundärprozess) keinen zusätzlichen Einfluss.
- Bei diesen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass gemäss der heutigen Gefahrenkarte [S1] der Öschibach selbst ab einem HQ100 über die Ufer tritt. Das bedeutet, dass ab einem solchen Ereignis mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht die ganze Fracht bis in die Kander gelangt.
- Hyperconcentrated flow: Unter hyperconcentrated flow versteht man einen Abfluss mit einer hohen Konzentration an mitgeführtem Feinmaterial. Durch die gegenüber Wasser erhöhte Dichte und Viskosität resultiert eine deutlich erhöhte Geschiebetransportkapazität als bei herkömmlichem fluvialen Transport (Grössenordnung 100 %). Bei den sehr wahrscheinlichen Szenarien (keine Vollverfüllung durch fluviale Prozesse) könnte eine Kombination mit hyperconcentrated flow zu einer vollständigen Gerinneverfüllung führen. ... Insgesamt wird davon ausgegangen, dass das Risiko, welches von den Tertiärprozessen ausgeht, durch Kombinationen mit einem hyperconcentrated flow nicht massgeblich verändert wird.
- Das Modell Mormo wurde mittels Simulationen von Normaljahren plausibilisiert.

Beurteilung

Die durchgeführten Berechnungen erscheinen uns grundsätzlich plausibel. Eine wichtige Frage ist aber, ob die Plausibilisierung des Modells Mormo mittels Simulationen von Normaljahren als «Eichung» des Modells bzw. der «Plausibilität» der gewählten Inputparameter (z.B. kritische Schubspannung bei Transportbeginn) ausreichend ist. Da gerade in Normaljahren wenig Geschiebetransport stattfinden wird, ist eine solche «Plausibilisierung» mit (grösseren) Unsicherheiten behaftet.

Die Unsicherheiten der Geschiebetransportmodellierungen in der Kander sollten abgeschätzt werden. Dazu sollten auch die Unsicherheiten bzgl. des Geschiebeeintrages aus dem Öschibach betrachtet und diskutiert werden.

Es ist nicht klar, wie genau der Transport von Feinmaterial berechnet wurde (Integration einer angenommenen Verteilung der Schwebstoffkonzentration über die Abflusstiefe?), und welche Annahmen die Berechnungen wie stark beeinflussen. [Diese Fragen lassen sich aus der Konsultation von Einstein (1950) bzw. Malcherek (undatiert) nicht einfach beantworten.] Wie gut passen die numerischen Berechnungen der Schwebstoffkonzentration mit einfachen empirischen Abschätzungen (über angenommene mittlere Schwebstoffkonzentrationen) zusammen?

Bei einem hyperconcentrated flow scheint eine Erhöhung der Transportkapazität bis zu einem Faktor 3 möglich, d.h. eine Zunahme um 200% im Vergleich zu normalen Transportbedingungen (Rickenmann 1991). Die Möglichkeit, dass es mit einem hyperconcentrated flow aus dem Öschibach zu einer vollständigen Gerinneverfüllung der Kander kommt, überschneidet sich wohl teilweise mit dem Szenario «Schuttstrom» bis in die Kander. Könnte der Fall hyperconcentrated flow dazu führen, dass eine Vollverfüllung der Kander im Bereich der Mündung des Öschibachs erst «später» (bei mehr Sedimenteintrag aus dem Öschibach) eintritt?

Aus unserer Sicht fehlt hier das Szenario Schuttstrom bis zur Kanderermündung (s. auch Kap. 6.6. und 7.5), mit möglichen Auswirkungen auf den Geschiebetransport in der Kander.

7.7 Wirkungsräume Tertiärprozesse

Zusammenfassung der Befunde

- Entsprechend den Handlungsempfehlungen berücksichtigen die Wirkungsräume für die Tertiärprozesse keine baulichen Schutzmassnahmen. Auch Interventionen während oder zwischen den Ereignissen sind nicht angenommen. Die realisierten Schutzmassnahmen für die Sekundärprozesse sind in diesen Wirkungsräumen allerdings berücksichtigt.
- Variante A: Der Öschibach fliesst nach dem Sekundärprozess weiterhin durch das heutige Gerinne ab, wobei er Geschiebe mobilisiert und in die Kander transportiert.
- Variante B: Das Gerinne vom Öschibach verfüllt vollständig oder der Abflussquerschnitt unter den bestehenden Brücken ist nicht mehr ausreichend.
- Für die Berechnung des Geschiebetransportes im 1D-Geschiebemodell tritt die Hochwasserspitze im Öschibach jeweils vor der Hochwasserspitze der Kander auf. Daraus folgt, dass das Gerinne unterhalb der Öschibachmündung verfüllt ist, sobald die Hochwasserspitze der Kander auftritt.

- Die hydraulische Modellierung der Wirkungsräume Tertiärprozesse hat gezeigt, dass bei einem Eintreten einer Vollverfüllung der Kander (Variante 1) und/ oder des Öschibachs (Variante 2), grosse Flächen des Siedlungsgebiets von Kandersteg überflutet werden.
- Die Fliesswege des Wassers ändern sich nicht grundlegend durch die Ablagerungen infolge Sekundärprozesse. Je nach Ablagerungen wird der Wirkungsraum des Tertiärprozesses etwas eingeengt und fällt kleiner aus.
- Einzelne Szenarien der Sekundärprozesse führen zu grossen Flutwellen mit Auswirkungen im gesamten Unterlauf der Kander. Die entsprechenden Wirkungsräume sind zum aktuellen Zeitpunkt in Ausarbeitung.

Beurteilung

Wir schätzen die Beurteilung als plausibel ein.

Es ist zu prüfen, inwiefern das Szenario «Schuttstrom» bis in die Kander die betroffenen Wirkungsräume und Wahrscheinlichkeiten durch Tertiärprozesse beeinflusst, da durch einen «Schuttstrom» evtl. mehr Material im Mündungsbereich abgelagert würde als durch die in den Szenarien T1 bis T5.2 abgeschätzten Einträge.

7.8 Beurteilung der berechneten Sedimentfrachten

Zusammenfassung der Befunde

- Die berechneten Geschiebeablagerungen, welche im Regeljahr im Öschibach anfallen, wurden den Kiesentnahmen aus den letzten Jahren gegenübergestellt. Daraus geht hervor, dass die Grössenordnung der berechneten Geschiebemengen im Öschibach in einer plausiblen Grössenordnung liegen.
- Eine Plausibilisierung der berechneten Schwebstofffrachten ist schwierig. So wurden gemäss Benno Zarn, HZP, an der Rabiusa (GR) bei natürlichen Hochwasserereignissen Schwebstoffkonzentrationen von ca. 530 g/l gemessen. Der Oberlauf der Rabiusa ist mit dem Öschibach vergleichbar. Für den Öschibach wurden im Zuge dieser Studie Schwebstoffkonzentrationen bei Hochwasser zwischen 250 und 430 g/l berechnet. Weitere Vergleiche für die Schwebstofffrachten in der Kander zeigen, dass die berechneten Konzentrationen und Mengen an Feinmaterial ähnliche Grössenordnungen aufweisen wie in den durchgeführten Messungen vergleichbarer Gewässer (Kander-Hondrich, Lütschine-Gsteig).

Beurteilung

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Unsicherheiten bei Geschiebetransportberechnungen eher hoch sind. Dazu sollten auch Angaben gemacht werden. Alternativ dazu könnten z.B. auch verschiedene Berechnungsansätze verwendet werden und so die möglichen Unsicherheiten illustriert werden (vgl. auch Punkt D in Kap. 4.3).

Die Angaben zu den Schwebstoffkonzentrationen sollten die Einheit «mg/l» und nicht «g/l» haben. Dies geht aus einer Plausibilitätsbetrachtung hervor, wenn man die abgeschätzten Feinmaterialvolumina in Folge Schwebstofftransportes vom Öschibach in die Kander (Tab. 7 in HZP 2020) mit den Abflussvolumina der Hochwasserereignisse im Öschibach (Abb. 2 in HZP 2020) vergleicht. Zudem würden derart hohe Schwebstoffkonzentrationen im Bereich von einigen 100 g/l zu murgangartigen Abflüssen führen.

7.9 Schutzmassnahmen Tertiärprozesse

Zusammenfassung der Befunde

- Nach Eintreten der möglichen Sekundärprozesse infolge Aktivitäten am Spitze Stei können die untersuchten Tertiärprozesse zu einer wesentlichen Zunahme der Hochwassergefährdung führen.
- Die Prozesse ausgehend vom Spitze Stei sind schwer prognostizierbar und die Ausgangslage kann sich innerhalb kurzer Zeit verändern. Für die Tertiärprozesse, welche am unteren Rand des Gebiets auftreten, sind ein Monitoring und ein geeignetes Interventionskonzept die wichtigsten Massnahmen.
- In der Kander ist im Mündungsbereich des Öschibachs eine Interventionsstelle zu sichern, welche die Zugänglichkeit und den notwendigen Platz für Materialentnahmen gewährleistet.
- Auch wenn im heutigen Zustand erst ab seltenen Ereignissen mit Wasseraustritten zu rechnen ist, wäre aufgrund des ungenügenden Freibords als präventive Massnahme eine Sohlabsenkung im Mündungsbereich vom Öschibach sinnvoll.
- In Absprache mit der Schwellenkorporation wurden vor Ort lokale Sofortmassnahmen definiert (lokale Ufererhöhungen, evtl. lokalen Anpassungen im Bereich der Brücken Öschistrasse und Äussere Dorfstrasse, sowie Massnahmen zur Rückleitung von ausgetretenem Wasser in die Kander).
- Mit einer lokalen Aufweitung der Kander im Bereich der Öschibachmündung könnte die Ablagerungskapazität erhöht und zusätzliche Reserve geschaffen werden, bevor Wasser über die Ufer tritt.
- Durch eine Erhöhung der rechten Uferseite der Kander zwischen dem Schwimmbad und der Gandstrasse mittels Dämmen oder Mauern könnte verhindert werden, dass das Wasser rechtseitig über die Ufer tritt. Dadurch wird zwar die linke Uferseite stärker überflutet, das Schadenpotential ist hier aber deutlich geringer und die Überflutungsflächen durch den Bahndamm begrenzt.
- Linksseitige Austritte aus der Kander treten ungefähr zwischen der Bahnhof- und der Risetistrasse auf. Diese könnten mit einem linksseitigen Damm entlang der Kander verhindert oder durch einen Querdamm zwischen Kander und Bahndamm begrenzt werden.
- Durch das Entfernen der Schwellen (150-200 m resp. 500 m unterhalb der Öschibachmündung) liesse sich die Kandersohle bis zur Öschibachmündung leicht absenken oder ein höheres Längsgefälle einstellen und dadurch die Gerinnekapazität erhöhen. (Der Nutzen wäre relativ gering).
- Auch eine Aufweitung des Öschibachs im Mündungsbereichs bzw. eine Optimierung des Mündungsbereichs wird als nicht zielführend betrachtet.

Beurteilung

Wir schätzen die Beurteilung als plausibel ein.

7.10 Empfehlung für weiterführende Arbeiten

Ein mögliches Zusammenspiel zwischen einem Sturzereignis am Spitze Stei, Folgeprozessen im Öschibach und der Kander (Hochwasser) sowie einem regionalen Unwetterereignis sollte näher untersucht werden.

8 Nachvollziehbarkeit und Dokumentation

8.1 Struktur der beiden Berichte

Der Bericht NDR/Hunziker (2020) besteht aus zwei Teilen. Teil 1 erläutert die Grundlagen für die Faktenblätter im Teil 2.

Im Teil 1 sind neben den kurzen methodischen Angaben die grundsätzlichen Voraussetzungen für Sekundärprozesse genannt sowie Annahmen zu den Sturzscenarien und für eine Seebildung genannt. Darauf basierend werden Szenarien beschrieben und Angaben zu Wirkungsflächen gemacht. Darin eingeschlossen werden die Berücksichtigung von Sofortmassnahmen erläutert und eine Bewertung der Wahrscheinlichkeiten vorgenommen sowie eine Übersicht über betroffene Gebiete gegeben. Der Teil 1 schliesst mit Empfehlungen für die Notfallplanung, sowie planerischen und baulichen Massnahmen ab.

Der Teil 2 besteht aus sog. Faktenblättern. Diese weisen in strukturierter Form Angaben zu sämtlichen Szenarien aus. Nach einer Beschreibung des Szenarios folgen Karten mit den Wirkungsflächen gefolgt von Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten des Szenarios, den Voraussetzungen, welche zum Eintreten führen und einer Übersicht über die massgebenden Prozesskennwerten. Ein Beschrieb des Wirkungsraums, dem Verhalten von Schutzbauten und Möglichkeiten der Intervention runden ein Faktenblatt ab.

Der Bericht HZP (2020) ist klassisch aufgebaut und nennt nach Ausgangslage und Auftrag die verwendeten Grundlagen, Definitionen der relevanten Prozesse und erläutert die Methodik.

Im Kapitel Hydrologie wird auf Hochwasserereignisse im Öschibach und der Kander eingegangen. Danach folgen Angaben zur Geschiebemobilisierung und den Einträgen während den Tertiärprozessen. Die Szenarien werden um die Tertiärprozesse erweitert und in Verbindung gebracht mit Hochwasserprozessen in der Kander. Bevor die Wirkungsräume der Tertiärprozesse beschrieben werden, werden Aussagen zur Geschiebmodellierung in der Kander, dem Zusammenspiel zwischen Öschibach und Kander und dem Eintrag bei hyperconcentrated flows gemacht. Abschliessend folgen eine Beurteilung der Resultate und Hinweise zu Schutzmassnahmen. Ein Anhang gibt eine Übersicht über Einwirkungsgebiete der Sekundär- und Tertiärprozesse.

8.2 Beurteilung der formalen Aspekte in den beiden Berichten

Sowohl der Aufbau wie auch die Strukturierung der beiden Berichte entspricht den gängigen Praxis. Überlegungen und Annahmen sind grundsätzlich logisch aufgebaut und die Schlussfolgerungen sind nachvollziehbar. Die übersichtliche und klar strukturierte Darstellung von Angaben zu den einzelnen Szenarien auf den Faktenblättern zu den Sekundärprozessen beurteilen wir grundsätzlich als positiv.

Die wichtigsten Inhalte sind in eher kurz beschriebenen Kapitel enthalten und erlauben die nachvollziehbare Erfassung der Aussagen. Insgesamt ist die Vollständigkeit der Dokumentation in Bezug auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Vorgehens (sowie die Nennung von Quellen) eher als knapp zu bezeichnen.

Im Detail fehlen insbesondere im Bericht NDR/Hunziker (2020) diverse Informationen zu getroffenen Annahmen und verwendeten Verfahren oder Formeln. So ist etwa in den Faktenblättern bei

den Prozesskennwerten die Annahmen zur Wahl der Vorfaktoren beim Potenzgesetz zur Abschätzung des Maximalabflusses eines Murgangschubes aus den Ereignisvolumen nicht ganz klar (vgl. Kap. 6.5 und 6.6). Ebenso ist nicht klar, ob die Abschätzung auf einem Schubvolumen oder einem Gesamtvolumen basiert. Insgesamt fällt der Methodenbeschrieb sehr spärlich aus, was vermutlich auf die relativ kurze Bearbeitungszeit zurück zu führen ist.

Die nur konsultativ verwendeten numerischen Simulationsresultate im Bericht NDR/Hunziker (2020) sind nicht dokumentiert (z.B. in einem Anhang) oder referenziert. Im Bericht selber sind sie nur sehr spärlich beschrieben (rein qualitativ). Die nachgelieferten Karten von numerischen Simulationsresultaten enthalten nur Angaben zu den maximalen Fliesstiefen. Informationen zu Ablagerungsflächen oder –volumen sowie zu Fliessgeschwindigkeiten fehlen. Es fehlen auch Begründungen zur Wahl der verschiedenen Modellparameter. Insbesondere werden die Annahmen zu den wichtigen Reibungsparametern (basale Reibungskoeffizient μ , bzw. die Grenzschubspannung τ_B) nicht diskutiert und begründet.

Diverse Bezeichnungen oder Abkürzungen werden in den beiden Berichten nicht sauber definiert, so z.B. «Schuttstrom» (vgl. Kap. 4 in NDR/Hunziker 2020) oder «LLE» (vgl. Kap. 7.2 in HZP 2020), «Qm» (vgl. Kap. 7.2, Tab. 10 in HZP 2020). Es wird z.B. auch auf frühere Studien verwiesen, ohne eine Literaturreferenz anzugeben (vgl. Kap. 10 in HZP 2020).

9 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen unter Berücksichtigung der realisierten und geplanten Massnahmen

Ausgangslage und zwischenzeitliche Entwicklung

Die vorliegende Zweitmeinung beurteilt in den vorhergehenden Kapiteln den Stand des Wissens vom Sommer 2020. Inzwischen sind einerseits neue Erkenntnisse betreffend die Szenarien, aber insbesondere auch massgebende Geländeanpassungen vorgenommen worden. Als wichtigste Änderung gegenüber dem Zustand vom Sommer 2020 ist der Bau der Leitdämme zu nennen. Der Leitdamm auf der nördlichen Seite (Zilfuri) wurde offenbar als überströmbarer Damm konzipiert, während der südlich gelegene Leitdamm im Öschwald (zuerst) mehr als Geschiebeablageplatz (GAP) konzipiert war. Die Grundidee war dabei, dass im Rahmen der Bewirtschaftung des Geschiebeablageplatzes (GAP) das anfallende Material sukzessive bei diesem südlichen Leitdamm deponiert wird. Durch eine solche aktive Bewirtschaftung könnte in diesem Bereich im Prinzip eine grössere Mächtigkeit der (künstlichen) Ablagerungen erreicht werden, als sich bei einem natürlichen Auffüllen des GAP mit Überflüssen der Leitdämme im Überlastfall einstellen würde.

Die grundsätzliche Konzeption der Schutzmassnahmen im Zusammenhang mit dem GAP scheinen uns sinnvoll. Die von den Erstbearbeitern identifizierten Szenarien möglicher Murgangereignisse sind unseres Erachtens auch für die neue Situation unter Berücksichtigung der realisierten und geplanten Massnahmen sinnvoll.

Abschlussbauwerk beim GAP sowie Modellierung des Fliess- und Ablagerungsverhaltens von Murgängen

Die möglichst baldige Realisierung eines Abschlussbauwerkes beim GAP ist aus unserer Sicht zentral, um das potentiell vorhandene Ablagerungsvolumen im GAP möglichst gut auszunutzen zu können. Zur Zeit der Erstellung dieses Berichtes ist die genaue Ausgestaltung des Abschlussbauwerkes noch in Diskussion.

Detaillierte numerische Modellierungen erscheinen uns nötig, um (i) die Bedingungen für eine möglichst gute Ausnutzung des GAP im Fall längerdauernder oder grossvolumiger Murgangaktivität abzuschätzen, (ii) eine sinnvolle Ausgestaltung des Abschlussbauwerkes (inklusive Überlaufsektion) zu planen, und (iii) genauere Hinweise zu erhalten, wo ein Überfließen im Überlastfall zu erwarten ist.

Optimale Ausnutzung und Bewirtschaftung des GAP

Wir meinen, dass für eine detailliertere Modellierung des Ablagerungsverhaltens im GAP Szenarien mit mehreren Schüben modelliert und die Topographie bei neuen Ablagerungen aufdatiert werden sollten. Dies könnte auch mit unterschiedlich komplexen Modellen erfolgen, z.B. mit 2d numerischen Modellen oder auch mit dem einfachen Modell TopRunDF, wobei verschiedene Murgangtypen (granular, schlammstromartig) berücksichtigt werden sollten.

Ein Vorgehen nach Punkt G im Kap. 4.3 scheint uns insbesondere notwendig, um das Ablagerungsverhalten im GAP und eine möglichst optimale Ausnutzung des Ablagerungsraumes besser abschätzen zu können. Aus dieser Analyse könnte man allenfalls auch geeignete Massnahmen bezüglich

gezielter Terrainveränderungen im GAP ableiten, welche z.B. eine gute (bessere) Ausnützung des südlichen Teiles des Ablagerungsraumes im Öschwald begünstigen könnten. Nach einer Teilfüllung und vorhandener Erfahrung mit dem Ablagerungsverhalten bzw. aus Erkenntnissen aus der Modellierung der Ablagerungen liesse sich evtl. die Bewirtschaftung bzw. Ausnützung des GAP verbessern.

Auch die grosse Gesamtbreite im oberen Teil des GAP sowie die unregelmässige Topographie sind Gründe, weshalb eine 2d-Modellierung, mit mehreren Schüben und Anpassung der Topographie bei neuen Ablagerungen, sinnvoll ist, um das Ablagerungsverhalten genauer zu untersuchen.

Generell könnte aus den Murgangfrachten (pro Schub) und den modellierten Ablagerungsflächen ein «simulierter» Mobilitätskoeffizient k_B bestimmt werden (s. auch Kap. 4.3). Dies würde zeigen, ob mit den angenommenen Modellparametern das Fliessverhalten eher einem schwach mobilen (granularen) Murgang oder einem mittel bis stark mobilen (schlammstromartigen bzw. flüssigen) Murgang entspricht.

Zu erwartende Ablagerungen ausserhalb des GAP (Überlastfall)

Auf der Basis verschiedener Szenarien ist gemäss den Erstbearbeitern mit Murgangablagerungen ausserhalb der geplanten Schutzdämme zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass die zu erwartenden Ablagerungsmuster bei schlammstromartigen Murgängen (die bis zum unteren Ende des GAP fliessen) stark auch von einem Abschlussbauwerk sowie von dessen Ausgestaltung (z.B. Höhe einer Entlastungssektion) abhängig sein werden.

Gemäss Abbildungen mit den Ablagerungsmustern der Erstbearbeiter würde eine mehr oder weniger gleichmässige Ablagerung auf der Aussenseite der Dämme (mit der damals angenommenen Höhe von 3 m) stattfinden. Bei Szenario F2 z.B. würde dies über eine gesamte Dammlänge von über 1 km erfolgen. Für Murgangabflüsse erscheint uns eine Damm-parallele Ablagerung auf der Aussenseite der Dämme auch für die Szenarien E3 und B unplausibel. Es scheint uns auch fraglich, ob die abgebildeten Wirkungsgebiete für die Szenarien A1 - A3 (Flutwellen) unter Berücksichtigung der Dämme von einer hydraulischen Simulation bestätigt würden. Es ist uns klar, dass die Simulationen nicht der heutigen Situation mit grösseren Dammhöhen entsprechen. Wir erwarten jedoch, dass sich bei vergleichbaren Simulationen mit Berücksichtigung der effektiven Dammhöhen prinzipiell ähnliche Fragen stellen.

Des Weiteren erwarten wir, dass ein schlammstromartiger (mobilerer) Schuttstrom nach Überfliessen eines Abschlussbauwerkes (mit geringerer Höhe als die Dammabschlüsse) zuerst dem bestehenden Gerinne entlang bis zur Kander fliessen würde. Der Schuttstrom würde vermutlich etwa im Mündungsbereich der Kander stoppen und den nachfolgenden Teil des Schuttstroms im Gerinne zwischen Auslaufbauwerk und Mündung bremsen. In einer folgenden Phase könnte sich unterhalb des Abschlussbauwerkes bis zur Mündung eine Art sekundäre kegelförmige Ablagerung ausbreiten (Details wie Brücken, Strassen und Gebäude würden dieses Muster wohl stören aber nicht grundsätzlich ändern); dies ist auch deshalb zu erwarten, weil sich das Gerinne dort auf einer leicht erhöhten Lage auf dem Kegel befindet. Gemäss diesem erwarteten Ablagerungsverhalten sollten sich dann eher im der Kander nahesten Bereich des Kegels und auch seitlich des Kegels mächtige Ablagerungen ausbilden. Diese sollten vom Abschlussbauwerk bis zur Mündung tendenziell eher abnehmen. Bei sehr zähflüssigen (granularen) Murgängen ist eine Ablagerung im oberen Teil des GAP zu erwarten, und im Falle von grossen Volumen ist ein Überfliessen der Dämme denkbar, bevor die vordersten Ablagerungen das Abschlussbauwerk erreichen. Wir halten ein mehr oder weniger gleichmässiges Überströmen der Dämme über eine grössere Länge für fraglich.

Diese Beurteilung ist nur eine grobe qualitative Einschätzung des möglichen Ablagerungsverhaltens, welches aus unserer Sicht durch detaillierte numerische Simulationen überprüft werden sollte. Es ist zu erwarten, dass sowohl die Materialeigenschaften eines Murganges (eher granular

oder eher schlammstromartig) sowie die Anzahl und Grösse einzelner Schübe das Ablagerungsmuster im GAP beeinflussen. Beide Faktoren zusammen werden auch Ort und Intensität des Überfließens aus dem GAP steuern.

Für die Szenarien A1 und A4 (Flutwellen), mit einem mittleren Volumen (300'000 – 500'000 m³) und wahrscheinlichem Auftreten als Sekundärprozess bzw. als möglichem Auftreten bezüglich Gesamtwahrscheinlichkeit (s. Abb. 6), sollten die potentiellen Überflutungsflächen mit einer hydraulischen Simulation bestimmt werden. Da eine solche Flutwelle tendenziell einen grösseren Maximalabfluss (sowie Fliesstiefe und Geschwindigkeit) aufweist als ein «normaler» Murgangschub, sollte auch das Abschlussbauwerk entsprechend massiv ausgeführt werden. Könnte in einem solchen Fall der grosse Teil der Feststoffe in der Flutwellenfront (evtl. ähnlich einer Murgangfront) beim Abschlussbauwerk aufgehalten werden, würden entsprechend mehr Feststoffe im GAP zurückgehalten und eine geringere Gefährdung ausserhalb des GAP resultieren, als im Falle eines zerstörten oder beschädigten Abschlussbauwerkes.

Allgemeine Bemerkungen

Schliesslich hängt auch die Bestimmung der Wirkungs- bzw. der Gefährdungsgebiete wesentlich von der Analyse des Fliess- und Ablagerungsverhaltens ab (Szenarien bzw. Murgangeigenschaften sowie Anzahl und Grösse der Schübe).

Im Bericht CSD/SLF (2020) wird erwähnt, dass für die Fallbeispiele Pizzo Cengalo und Brinz/Brinzauls (GR) ein probabilistischer Ansatz für die Auslaufmodellierung gewählt wurde. Dieser erlaubt es, die Unsicherheiten bei der Modellierung des Fliess- und Ablagerungsverhaltens quantitativ und transparent darzulegen. Dabei wurde gemäss CSD/SLF (2020) ein breiter Bereich für die Modellparameter μ , ξ , etc. gewählt und mittels Experteneinschätzung gewichtet. Analog dazu wäre ein probabilistischer Ansatz auch für eine Murgangmodellierung sinnvoll, wobei die Streuung des k_B Mobilitätskoeffizienten z.B. durch Dichtefunktionen angenähert werden könnten (z.B. grobe Unterscheidung in granulare Murgänge mit kleineren k_B Werten und in schlammstromartige Murgänge mit grösseren k_B Werten).

Gefährdungszonen und Notfallplanung

Bauliche Schutzmassnahmen

Die Szenarien E (Gerinnemurgänge) haben eine hohe Eintretenswahrscheinlichkeit. Dies bedingt folgende (wichtige) Massnahmen: (i) Regelmässiges Freihalten des GAP, (ii) Ausbaggern des Gerinnes im Abschnitt zwischen GAP und Kander sowie entfernen der Kiesablagerungen im Zusammenfluss mit der Kander, (iii) Regelmässiges Beobachten der Bedingungen im Ablagerungsgebiet der Stürze (mobilisierbare Kubaturen) und des Gerinnes vom Holzspicher bis in den GAP.

Notfallmassnahmen

Bezüglich Notfallmassnahmen sind wir mit den Aussagen in den Berichten NDR/Hunziker (2020) und HZP (2020) einverstanden: Die Szenarien, welche von einem Aufstau des Oeschinensees ausgehen (Szenarien A1 - A4, mit Flutwellen), stellen einen speziellen Fall dar. Sie erfordern vor allem: (i) Kontinuierliches Beobachten und Messen des Pegels im Oeschinensee und der Abflussverhältnisse/Quellen in der Sturzablagerung (Monitoring), (ii) Prüfen der Installation von Pumpen um allenfalls den Pegelanstieg zu verlangsamen/verhindern oder Prüfen des Grabens eines Entlastungs-

gerinnes in der Sturzablagerung, (iii) Beurteilen der durch eine Flutwelle ausgelösten Gefahrenprozesse und Kartieren der potentiellen Überflutungsflächen im Kandertal, mit Prüfen allfälliger Evakuierungen.

Geplanter Überlastkorridor

Für den Fall, dass der Öschibach zwischen GAP und Kantonsstrasse durch Geschiebeablagerungen verstopft ist und dass unterhalb des GAP primär noch Wasser abfliessen würde, macht ein Überlastkorridor nördlich des Kandergerinnes unseres Erachtens durchaus Sinn. Bei der geplanten Variante führt die Überlastung oberhalb der katholischen Kirche rechts aus dem GAP über die Adolf-Ogi-Strasse am Schwimmbad vorbei in die Kander.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte mit Angabe des Betrachtungsperimeters Öschibach und Kander in Kandersteg unterhalb der Hanginstabilität «Spitze Stei»	4
Abbildung 2: Seestand Oeschinensee in den Jahren 2011 bis 2020 (Quelle: Licht- und Wasserwerk AG Kandersteg)	17
Abbildung 3: Niederschlagsdaten (Flüssigniederschlag) an der Station Fisistock (2155 m ü.M.) für die Jahre 2011 bis 2017 (Quelle: IMIS, SLF) mit Darstellung der Niederschlagssummen je Niederschlagsereignis (oben) und den Summenkurven je Jahr (unten).	18
Abbildung 4: Abb.4 aus NDR/Hunziker (2020), basierend auf Tabelle 1 in GEOTEST (2019) und mit neuer Szenarienummerierung. Anpassung bei Szenario 8 mit Erhöhung von 15 auf 20 Mio. m ³ und neu ergänztem Szenario 5. Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten der Sturzscenarioen fehlen.	25
Abbildung 5: Beispiele von Sturzablagerungen auf Schnee oder Eis mit erhöhten Auslaufdistanzen. ol: Wisshorn, Safiental 2019 (GR), or: Val Strem, Sedrun 2016 (GR), ul: Mt. Darwin 2021 (NZ), ur: Huascarán 1970 (PE)	26
Abbildung 6: Entspricht Abb. 7 aus Bericht NDR/Hunziker (2020) – Die Abbildung enthielt einen Tippfehler, den wir korrigiert haben (Volumen Szenario E3). Die Herleitung der Wahrscheinlichkeiten der Primärprozesse ist unklar. Wir vermuten, dass dies an einer Besprechung zwischen den Bearbeitern der Primär- und Sekundärprozesse festgehalten wurde. Der Punkt wird aber in der Zweitmeinung zu den Primärprozessen nicht weiter ausgeführt.	31
Abbildung 7: Simulationsresultat: (Max.) Abflusstiefen einer Flow-2D Modellierung von DSM für einen mittleren, nassen Murgang von 40'000 m ³ auf einer Topographie mit 6 x 6 m Gittergrösse.	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prioritäten der Befunde und der Empfehlungen in der Zweitmeinung.....	1
------------	---	---