
Bericht Nr. 1418139.1

Einwohnergemeinde Kandersteg, Kandersteg

Kandersteg, "Spitze Stei"

Expertenbericht Phase A und B

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Rachel Riner	Gesamtbericht
Cornelia Brönnimann	Modellierung Bergsturz mit RAMMS:DebrisFlow
Patrick Baer	Modellierungen Bergsturz mit DAN3D, Murgang mit RAMMS:DebrisFlow, Impulswelle
SLF	Modellierung Druckwelle
Kaspar Graf	Geologie
Daniel Tobler	Sicherheitszonen, Monitoring
Supervision	Visierte Inhalte
Daniel Tobler	Gesamtbericht
Hinweise	

GEOTEST AG


Kaspar Graf


Rachel Riner

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Ausgeführte Arbeiten	4
3.	Geologisches Modell.....	5
4.	Fels-/Bergsturzscenarien	9
5.	Prozessmodellierungen.....	10
5.1	Bergsturz.....	10
5.2	Sekundärprozesse	14
6.	Modellierungsergebnisse	18
6.1	Bergsturz.....	18
6.2	Sekundärprozesse	19
7.	Diskussion und Unsicherheiten.....	21
8.	Sicherheitszonen Primärprozesse	23
9.	Monitoringkonzept Primärprozesse	26
9.1	Ausbau bisheriges Monitoring	26
9.2	Ausbau im Eskalationsfall	27
9.3	Gefahrenmanagement	28
10.	Schlussbemerkungen.....	28
11.	Literaturverzeichnis	30

Anhänge

Resultate Sturzmodellierungen RAMMS	1.1 – 1.7
Resultate Sturzmodellierungen DAN3D	2.1 – 2.7
Parametersetting und Resultate Impulswelle	3
Resultate Druckwellenmodellierung	4.1 – 4.2
Resultate Murgangmodellierung	5.1 – 5.2
Sicherheitszonen	6.1 – 6.3
Gefahrenstufe gem. KAWA	7
Geologisches Längenprofil	8.1 – 8.3
Glossar	9

1. Einleitung

Das Gebiet um den „Spitze Stei“ oberhalb des Oeschinensees wird seit Mitte 2018 überwacht, nachdem grössere Felsbewegungen beobachtet wurden. Die durch das KAWA, Abt. Naturgefahren ausgeführten, bisherigen Messungen und Untersuchungen weisen auf teilweise starke Bewegungen einer grossen bis sehr grossen Felsmasse hin. Detaillierte Angaben zu den bisherigen Untersuchungen sowie Resultate sind im Grundlagebericht des KAWA zu finden [10]. Auf den Untersuchungen des KAWAs aufbauend, sollen in der Phase A für verschiedene Abbruchszenarien Prozessräume ausgedehnt werden. In der Phase B sind Murgangmodellierungen vorzunehmen sowie als Grundlage für das Gefahrenmanagement ergänzende Prozessmodellierungen auszuführen, Sicherheitszonen auszuscheiden und ein Monitoringkonzept zu erstellen. Zudem soll die Machbarkeit einer tiefen Bohrung abgeklärt werden.

2. Ausgeführte Arbeiten

Gemäss Pflichtenheft des KAWA vom 24. November 2018 wurden in der Phase A folgende Arbeiten ausgeführt:

- Startsituation (08.01.2019)
- Kritische Hinterfragung geologisches Modell und Szenarien
- Modellierungen Fels- bis Bergstürze mit zwei unabhängigen Programmen (RAMMS und DAN3D)
- Berechnung Druck- und Impulswelle
- Interpretation der Wirkungsräume
- Präsentation Resultate anlässlich der Sitzung mit dem KAWA, Abt. Naturgefahren vom 15.02.2019

Anlässlich der Sitzung 15.02.2019 wurden für die Phase B folgende Arbeiten definiert:

- Abklärung Machbarkeit einer Bohrung
- Modellierung weiterer Abbruchszenarien (1 Mio. m³) mit RAMMS und DAN3D
- Sensitivitätsanalyse Grossabbrüche (Szenarien 8 und 15 Mio. m³)
- Murgangmodellierung aus der Bergsturzmasse
- Ausscheidung der Sicherheitszonen Primärprozesse
- Erstellung Monitoringkonzept Primärprozesse

- Präsentation der Resultate anlässlich der Sitzung vom 18.03.2019
- Erstellung Expertenbericht inkl. Abgabe Geodaten und Prozesskarten

Der vorliegende Bericht umfasst die Resultate der beiden Phasen A und B.

3. Geologisches Modell

Der Grundlagebericht vom KAWA [10] gibt eine umfassende Übersicht der aktuellen Situation und der bisherigen Erkenntnisse. Er nimmt Bezug auf die neusten Publikationen zur Thematik Sturzereignisse Öschinensee. In diesem Sinn versteht sich die vorliegende Beschreibung als Ergänzung zu diesem Bericht. Aktuell bestehen keine neuen Untersuchungen der geologischen Situation im Gebiet „Spitze Stei“. Eine gemeinsame Begehung ist geplant, sobald es die Verhältnisse zulassen.

Das von den aktuellen Felsbewegungen erfasste Gebiet am „Spitze Stei“ bildet eine prominente, nach Norden zum Öschinensee abfallende Pyramide aus Fels und Lockermaterial (Abbildung 1). Morphologisch bildet der „Spitze Stei“ eine keilförmige Felsbastion zwischen der Zunge des Doldenhorngletschers im Osten und der mächtigen Gleitfläche des postglazialen Bergsturzes Üssere Fisistock - Kleindoldenhorn im Westen (Abbildung 2). Die Fläche des fraglichen Gebietes umfasst rund 0.6 km² von ca. 2'900 m ü. M. im Süden bis ca. 2'100 m ü. M. beim Steilabbruch im Norden.

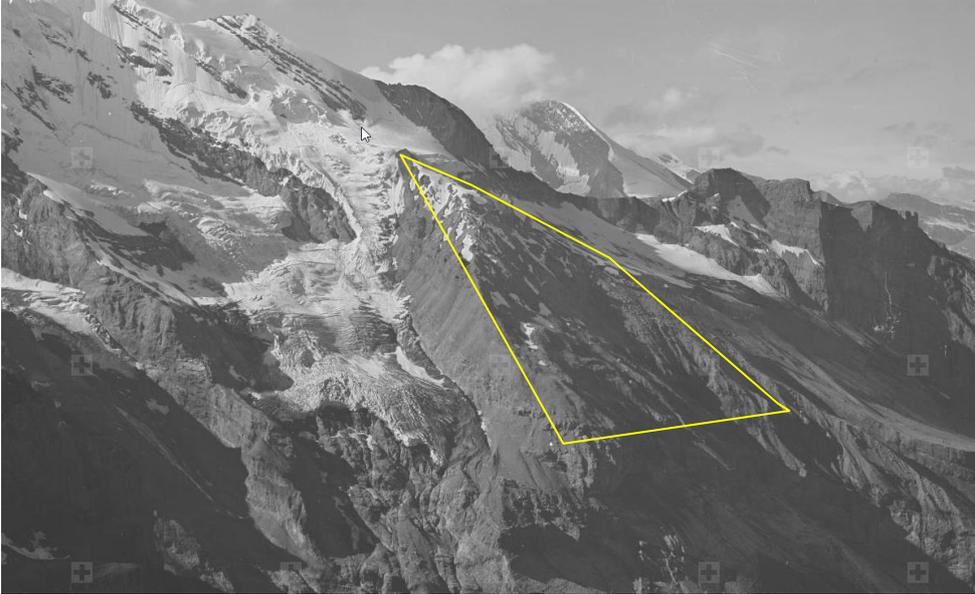


Abbildung 1: Luftaufnahme Swisstopo 1926; gelb = Formkontur Untersuchungsgebiet „Spitze Stei“.

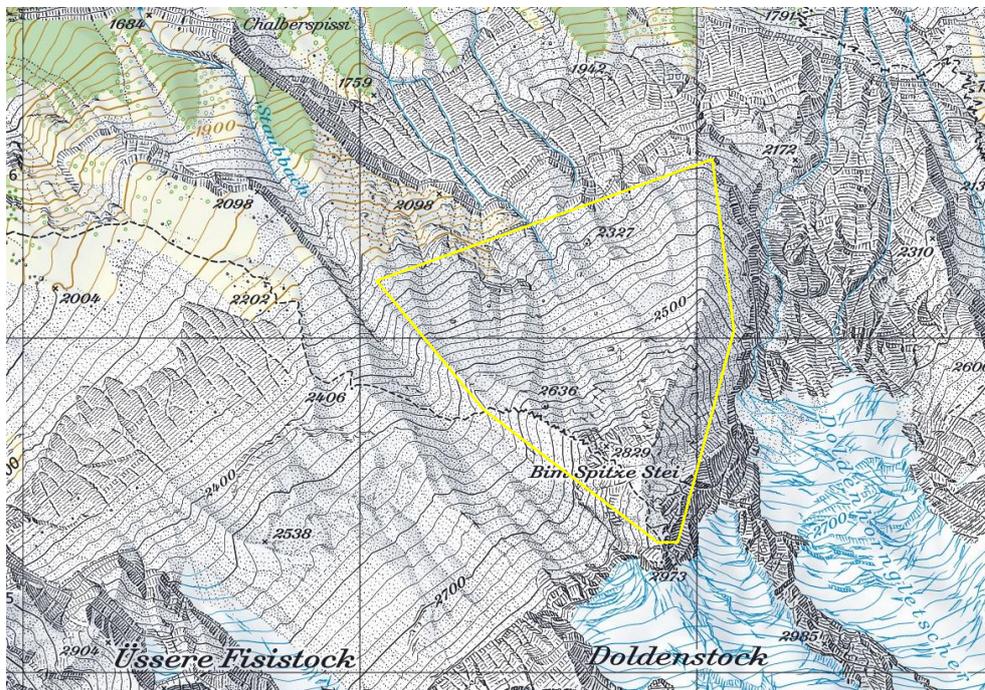


Abbildung 2: Kartenübersicht: Gelb = Formkontur „Spitze Stei“ (Bildquelle: Swisstopo, map.geo.admin.ch).

Die Gesteine gehören zur Kreide der Doldenhorndecke (Öhrli-Fm., Zementstein-Fm. und Quinten-Fm. im Hangenden), welche hier mit rund 30° nach NW einfällt. Das Gebirge ist zusätzlich in ENE – WSW streichende Falten gelegt und wird von zwei hauptsächlich, steilstehenden NW-SE und (konjugiert) ENE-WSW streichenden Bruchsystemen durchschlagen.

Bei den Gesteinen handelt es sich um massige Kalke an der Basis; darüber folgen „inkompetente“ bzw. weiche Mergel- und Tonschiefer und im Gipfelbereich „Spitze Stei“ wieder kompetentere Kalke.

Diese Wechsellagerung von Kalken und Schiefen, zusammen mit dem generellen Schichtfallen nach NW und den vorhandenen Bruchsystemen sind hauptsächlich Gründe für den labilen Gebirgsaufbau beim „Spitze Stei“.

Eine nähere Analyse vorhandener geologischer Daten [14] und der Auswertung von N. Hählen zur Verfügung gestellten Luftaufnahmen [11], konnte ein etwas detaillierteres geologisches Längs- und Querprofil (vgl. Anhang 8) durch den „Spitze Stei“ gezeichnet werden. Es zeigt sich, dass die Gipfelzone mit dem Grat zum Gletscher hin eine enge, südvergente Falte bildet. Dies bedeutet, dass die Zementsteinschichten südlich „Spitze Stei“ steilgestellt und überkippt werden, bzw. über die Öhrli-Kalke nach Norden gefaltet sind, was die teilweise intensive Verkipfung und Zerklüftung der Gipfelzone erklärt (Abbildung 3).



Abbildung 3: Überkippte, nordvergente Serie südlich „Spitze Stei“; rechts Zementstein-Schichten, links, bzw. unten Öhrli Kalke. Gelb = Schichtgrenzen; orange = Gesteinsgrenzen (Bildquelle: KAWA, 2018 [11]).

Auch die Quinterkalke an der Basis des Massivs „Spitze Stei“ bilden mehrere Serien liegender Falten. Die dazwischenliegenden „inkompetenten“ bzw. weichen Zementsteinschichten wurden durch die tektonischen Bewegungen ebenfalls erfasst.

Diese Faktoren haben zusammen mit der Auffaltung im Gipfelbereich von Doldenhorn und Fisistock die postglaziale Bergsturzgeschichte in diesem Teil des Tales kontrolliert, bzw. kontrollieren auch heute noch generell die Felsstabilität der südlichen Talseite von Oeschinen.

Prädisposition für Sturzereignisse

Alle bisherigen Beobachtungen und Messungen bestätigen die massiven Bodenbewegungen im Sommer/Herbst 2018 im Gebiet „Spitze Stei“. Diese Bewegungen werden sich in der kommenden Saison erneut manifestieren. Die Untersuchungen von Knapp et al. (2018) [13] an Sedimenten des Oeschinensees zeigen klar, dass sich beginnend mit dem Oeschinen-Bergsturz aus der Felsfront (aus Zementsteinschichten und Quintnerkalk) in den letzten 2'500 Jahren aus dem Gebiet „Spitze Stei“ bis zu sieben massive Felsstürze ereignet haben. Die Ereignisse konnten datiert und für das Ereignis von 1752 – 1768 sogar vermutlich dem Erdbeben von Naters – Brig von 1755 zugeordnet werden.

Die beiden Tatsachen, dass multiple Ereignisse bis in die jüngste Vergangenheit stattgefunden haben und dass Felsbereiche beim „Spitze Stei“ aktuell eine starke Beschleunigung erfahren, machen ein Sturzereignis in nächster Zukunft plausibel.

Insbesondere die Erkenntnis aus Knapp et al. (2018) [13], dass der Oeschinensee offenbar erst durch das Ereignis 2'500 v. Chr. gebildet wurde, ist bemerkenswert. Aus unserer Sicht zeigt sich, dass nicht (nur) die direkt postglazialen Instabilitäten die Talmorphologie bestimmen, sondern auch weit jüngere, nicht rein klimatisch bedingte Massenbewegungen.

Der intensive Zerfall der Gipfelzone vom „Spitze Stei“ entlang der steilen Kluffzonen ist ein Beweis, dass Bewegungen im Fels (Sackung) mit Gleiten und Verkippen schon lange stattfinden; d.h. der Klimawandel heute mit tauendem Permafrost ist „nur“ ein Förderfaktor.

4. Fels-/Bergsturzzenarien

Basierend auf der geologischen Analyse können für die Fels- und Bergsturzereignisse gemäss [10] die in der Tabelle 1 aufgeführten Szenarien unterschieden werden. In Abhängigkeit der Kubatur werden die Szenarien als „klein“, „mittel“ und „gross“ zusammengefasst.

Tabelle 1: Abbruchszenarien für Fels- und Bergsturzprozesse aus dem Gebiet „Spitze Stei“.

	Szenario (SZ)	Volumen	Beschreibung
„klein“	SZ1	200'000 m ³	Kleiner Ausbruch aus Gipfelbereich oder Teilabbruch aus Front der Masse
	SZ2	600'000 m ³	Grosser Felssturz aus Gipfelbereich mit Mobilisierung zusätzliches Material im Transitgebiet
„mittel“	SZ2b	1 Mio. m ³	Szenario Teilabbruch mit hochliegender Gleitfläche
„gross“	SZ3	3 Mio. m ³	Szenario Grossabbruch mit hochliegender Gleitfläche
	SZ4	8 Mio. m ³	Szenario Grossabbruch mit mitteltiefer Gleitfläche
	SZ5	15 Mio. m ³	Szenario Grossabbruch mit tiefliegender Gleitfläche

Ausgehend vom Grundlagebericht [10] sind folgende Sekundärprozesse relevant:

- Impulswellen (relevant ab Szenario SZ2)
- Druckwellen (relevant für die Szenarien SZ3 – SZ5)
- Murgänge aus den Bergsturzablagerungen für häufige Niederschlagsereignisse sowie Gewitterereignisse mit einem HQ20

5. Prozessmodellierungen

5.1 Bergsturz

Die Fels- und Bergsturzprozesse am „Spitze Stei“ wurden mit zwei unterschiedlichen 2.5D-Modellen (RAMMS:Rockfall und DAN3D) von zwei unabhängig arbeitenden Personen simuliert. Beide Modelle sind etabliert und wurden in der Vergangenheit für die Simulation grosser Massenbewegungen eingesetzt.

Die Eichung / Kalibrierung der Modelle erfolgte für kleine und grosse Massenbewegungen unterschiedlich. Kleine Ereignisse wurden mittels ROFMOD 5 kalibriert; grosse Ereignisse mittels untersuchter und gut dokumentierter Fels- und Bergsturzereignissen und Analogieschlüssen zu anderen Gebieten. Basierend auf der Kalibrierung wurde jedes Abbruchszenario mit einem optimistischen und einem pessimistischen Parametersetting modelliert. Die Auflösung des Höhenmodells betrug für die Modellierungen mit RAMMS 5 m und für die Modellierungen mit DAN3D 10 m.

Folgend werden die Modellansätze, die Kalibrierung sowie verwendeten Parameter kurz beschrieben.

5.1.1 RAMMS

RAMMS steht für Rapid Mass Movements. Entwickelt wurde das Modell an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Die Berechnungsgrundlage bildet das bekannte Reibungsmodell nach Voellmy-Salm. Von massgebender Bedeutung für die Berechnung der Auslaufdistanz sind dabei die turbulente und trockene Reibung.

- *Turbulente Reibung* (ξ): Quantifiziert den Verlust an kinetischer Energie, welcher durch Reibung zwischen den Partikeln und dem Boden entsteht. Der Wert hängt stark von Geometrie und Rauigkeit des Gerinnes ab.
- *Trockene Reibung* (μ): Hängt zum einen von den Materialeigenschaften ab (u.a. Dichte und Wassergehalt) und zum anderen vom Druck senkrecht zur Bodenoberfläche (Fließhöhe).
- *Dichte* (ρ): Ist stark von der Konsistenz des Murganges abhängig (granular, feinkörnig, schlammig).
- *Fließdruck* (λ): Quantifiziert die Menge an entzogener Energie, wenn das Geschiebematerial in die Länge gezogen oder gestaucht wird.

Modelleigenschaften „Spitze Stei“:

- *Auslöseparameter (Mächtigkeit und Lage des Abbruchs):* Die Lage der Blöcke wurde so gewählt, dass beim Kollaps möglichst keine Materialverluste nach oben und zur Seite entstanden. Die Mächtigkeit der Blöcke liegt je nach Ausbruchvolumen zwischen 10 und 20 m.
- *Abbruchkriterium:* Das Modell wurde bei einem Momentum (bewegte Masse) <10% abgebrochen.

RAMMS Kalibrierung

Das Modell wurde einerseits anhand der beiden prähistorischen Bergstürze Öschinensee (2'300 vor heute, 37 Mio. m³) und Kandertal/Fisistock (9'500 v.Chr., 800 Mio. m³) [12] und andererseits anhand von vergleichbaren Bergsturzmodellierungen mit RAMMS kalibriert (Tabelle 2). Zudem wurde eine 2D-Modellierung durchgeführt, um die Reichweite von Einzelblöcken mit einem Volumen von 10 m³ zu bestimmen. Szenario 1 wurde anhand dieser 2D-Simulation kalibriert.

Der Reibungsparameter ξ beeinflusst die Reichweite der Ablagerung nur marginal und wurde bei allen Szenarien auf 500 gesetzt. Der Reibungsparameter μ ist volumenabhängig. Die Szenarien mit kleinen Volumina (SZ1 und SZ2) unterscheiden sich in ihrem Verhalten von den Szenarien mit mittleren und grossen Volumina (SZ2b bis SZ5). Dies wurde bei der Parametrisierung entsprechend berücksichtigt. So wurde bei den Szenarien bis und mit 1 Mio. m³ $\mu = 0.25$ für den realistischen Fall, bzw. 0.2 für den pessimistischen Fall (gesättigter Boden, viel Wasser und Eis in der Sturzmasse etc.) gewählt. Bei den Szenarien >1 Mio. m³ wurde μ auf 0.2 herabgesetzt, bzw. auf $\mu = 0.15$ bei pessimistischen Annahmen.

Tabelle 2: Mit RAMMS modellierte Bergstürze.

Lokalität	Volumen in Mio. m ³	μ	ξ	Referenz
Chironico	300	0.4	500	[18]
Flims	10000	0.2	500	[18]
Goldau	25	0.15	500	[18]
Kandersteg	800	0.1	500	[18]
Kl. Rinderhorn	45	0.2	500	[18]
Köfels	2500	0.4	500	[18]
Totalp	660	0.15	500	[18]
Val Pola	40	0.3	500	[18]
Sasso Rosso	0.5	0.7	300	[17]
Motto d'Arbino	23	0.65	300	[17]

Val Canaria	0.38	0.65	250	[17]
Preonzo	0.3	0.65	300	[17]
Cerentino	0.13	0.65	300	[17]
Mount Cook	10	0.19	2'100	[19]
Mount Cook	0.15	0.14	3'000	[19]
Cuolm Da Vi	25	0.1-0.3	500	[21]
Cuolm Da Vi	25	0.36	10'000	[21]
Cuolm Da Vi	5	0.3	500	[21]
Cuolm Da Vi	5	0.44	10'000	[21]
Cuolm Da Vi	0.1 - 0.15	0.5	10'000	[21]
Cuolm Da Vi	10	0.4	10'000	[21]
Schlossplatte	2 - 6	0.5-0.65	300-500	[4]
GHK PeriGlazial	5 - 50	0.3-0.4	500	[1]
Punta Cola, Chile	8 - 22	0.18	180	[20]

Sensitivitätsanalyse Grossabbrüche

Für Grossabbrüche der Szenarien 4 und 5 (Volumina von 8 und 15 Mio. m³) wurde für den Ausbruchbereich eine qualitative Sensitivitätsanalyse ausgeführt. Dabei wurde das Ablösegebiet des westlichen Abbruchs (rund 10 Mio. m³) so auf den Westgrat des „Spitzen Steis“ gesetzt, dass das Bergsturzmaterial westlich des Holzspichers abgelagert wird. Damit wird das tendenziell NW orientierte Fallen der Gleitfläche und der damit verbundene gegen NW orientierte Bewegungsvektor der Bergsturzmasse berücksichtigt. Die Modellierungen wurden sowohl mit dem optimistischen als auch mit dem pessimistischen Parametersetting durchgeführt.

5.1.2 DAN3D

DAN3D steht für Dynamic Analysis of Landslides in Three Dimensions und ist ein bekanntes und weit verbreitetes numerisches Modell für die Simulation der Ausbreitung von gravitativen Prozessen (v.a. Fels-/Bergsturz und Murgang). Es erlaubt auch Aussagen zum Fließverhalten der Prozesse (Richtung, Geschwindigkeit, Höhe). DAN3D wird für die Analyse von bekannten Ereignissen und zur Beurteilung der involvierten Mechanismen eingesetzt. In gewissen Studien (z.B. Preonzo (Tessin) 2008, Cuolm Da Vi (Sedrun) 2013) wurde das Modell auch für Vorhersagen angewendet.

Der DAN3D-Ansatz ermöglicht die Annahme von unterschiedlichen internen sowie basalen Flieseigenschaften. Diese Trennung resultiert aus der klassischen Strö-

mungsmechanik, welche die innere Spannungsverteilung als hydrostatisch annimmt während die Grundreibung durch eine Vielzahl von turbulenten und viskosen Beziehungen bestimmt wird.

DAN3D hat mehrere Rheologiemodelle integriert. Das Coulombsche Reibungsmodell berechnet hohe Geschwindigkeiten und vorwärts gerichtete Ablagerungen während das Voellmy-Modell niedrigere Geschwindigkeiten und vorwärts gerichtete Ablagerungen schätzt. Die Ergebnisse sind dadurch stark von der gewählten Rheologie abhängig. Für die vorliegenden Modellierungen wurde das Coulombsche Reibungsmodell verwendet, welches den Fließprozess mit Hilfe von innerem Reibungswinkel Φ_i und basalem Reibungswinkel Φ_b beschreibt. Dies ist die Rheologie, welche mit DAN3D für vergleichbare Fälle am häufigsten verwendet wird.

Das Modell wurde hauptsächlich anhand von vergleichbaren Bergsturzmodellierungen mit DAN3D in anderen Gebieten kalibriert (Tabelle 3).

Tabelle 3: Mit DAN3D modellierte Bergstürze ähnlicher Ausprägung, welche für die Kalibrierung verwendet werden konnten.

Lokalität	Volumen [Mio. m ³]	Erreichtes Pauschalgefälle [°]	Basaler Reibungswinkel Φ_b [°]	Referenz
Frank Slide	30	16	14	[9]
Daubensee	4.6	21	17	[7]
Klein Rinderhorn	52	14	21	[7]
Rautispitz	91	18	10	[15]
Platten	11	21	20 (Ausbruchszone: 10)	[15]

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass sowohl die Auslaufdistanz als auch die Fließgeschwindigkeit primär vom gewählten basalen Reibungswinkel Φ_b beeinflusst sind. Das Modellresultat weist in Bezug auf den inneren Reibungswinkel Φ_i eine tiefe Sensitivität aus. Deshalb wurden für die Szenarien „optimistisch“, „realistisch“ und „pessimistisch“ jeweils nur die basalen Reibungswinkel variiert.

Die Reibungsparameter widerspiegeln die Beschaffenheit der Gleitfläche und des Untergrundmaterials als auch bis zu einem gewissen Grad die Wassersättigung. Bei hoher Wassersättigung liegt der basale Reibungswinkel tiefer als bei trockenem Material. Das Modellgebiet wurde in 3 verschiedene Zonen mit unterschiedlichen Reibungsparametern eingeteilt:

- Ausbruchs- und oberes Transitgebiet: Gleitschicht auf Fels, vereinzelt Einfluss von Schmelzwasser. Dadurch eher tiefe basale Reibungswinkel.
- Mittleres Transitgebiet: Sehr steil mit Felswänden durchzogen. Höhere basale Reibungswinkel, da ansonsten unrealistisch hohe Fließgeschwindigkeiten entstehen würden.
- Ablagerungsgebiet: Schuttkegel und alte Bergsturzablagerungen rund um den Oeschibach. Im pessimistischen Fall wiederum sehr tiefe Reibungsparameter, da eine hohe Wassersättigung angenommen wird. Im optimistischen Fall ist das Material trocken und weist einen hohen Reibungswiderstand auf.

Es zeigte sich, dass der basale Reibungswinkel im Ablagerungsgebiet die räumliche Ausdehnung der Bergsturzablagerungen stark beeinflusst. Im Ausbruchs- und Transitgebiet hingegen wirkt sich der basale Reibungswinkel primär auf die Fließgeschwindigkeit aus, hat aber auf die Ablagerungen weiter talabwärts kaum mehr einen Einfluss.

Die aufgrund der Kalibrierung verwendeten Reibungswinkel sind in Tabelle 4 erläutert. Für die kleinen Szenarien (SZ1: 200'000 m³) wurden die Parameter noch leicht angepasst.

Tabelle 4: Verwendete Reibungsparameter für die DAN3D Modellierungen.

	Φ_i	Φ_b optimistisch	Φ_b realistisch	Φ_b pessimistisch
Ausbruchsgebiet	28	14	14	14
Transitgebiet	35	25	21	21
Ablagerungsgebiet	30	25	21 / 25 (räumlich weiter aufgeteilt)	18

5.2 Sekundärprozesse

5.2.1 Impulswelle

Plötzliche Masseneinträge in stehende Gewässer können zu Impulswellen führen, welche sich bei einer allfälligen Überströmung des Ufers im Unterlauf als Flutwelle ausbreiten und als Folgeprozess auch Murgänge auslösen können. Aufgrund der

modellierten Fels- und Bergsturzzenarien muss ab dem Szenario SZ2 damit gerechnet werden, dass die Ablagerungen bis in den Oeschinensee gelangen können und eine Impulswelle auslösen.

Die Prozesskette „Masseneintrag in ein stehendes Gewässer → Bildung einer Impulswelle → Überlaufen des Ufers → Entstehung einer Flutwelle“ wurde mittels empirischen Ansätze der VAW untersucht [8]. Dieses Berechnungsverfahren unterscheidet bezüglich der Wellengenerierung zwischen 2D- (prismatischer Wellenkanal) und 3D- (rechteckiges Wellenbecken) Ausbreitung der Impulswellen.

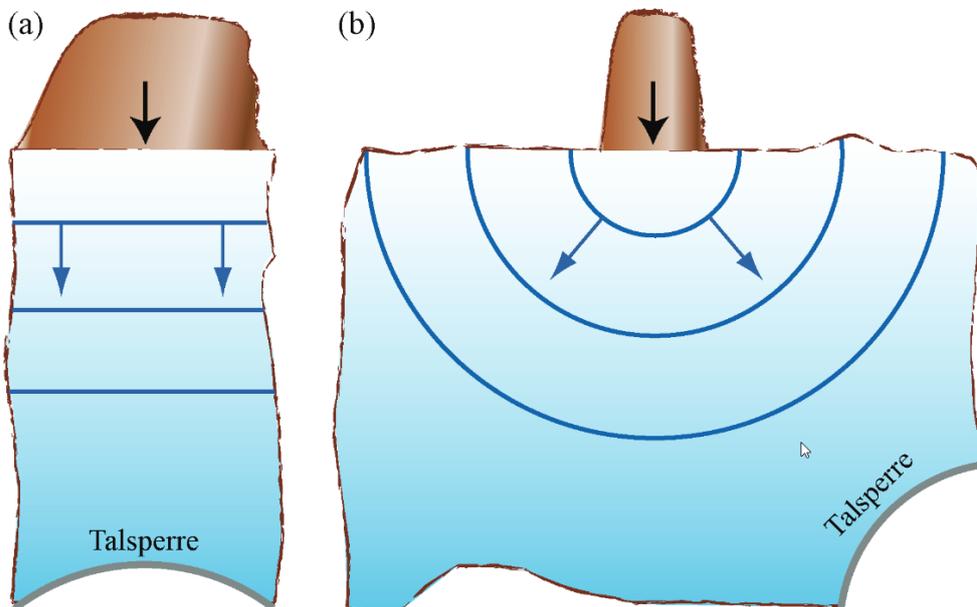


Abbildung 4: a) Extremfall mit längs eintauchendem Massenimpakt und eingeengter transversalen Wellenausbreitung (2D) und b) Extremfall mit seitlich eintauchendem Massenimpakt und völlig freier radialer Wellenausbreitung (3D).

Es wurde mit Kubaturen von $13'000 \text{ m}^3$ (SZ2) bzw. $53'000 \text{ m}^3$ (SZ3) gerechnet, welche in den See gelangen können. Die Kubaturen wurden aus den Bergsturz-Simulationen extrahiert. Jeweils wurden die Berechnungen mit der 2D-Methode und der 3D-Methode sowohl für eine optimistische als auch eine pessimistische Parameterwahl durchgeführt. Die verwendeten Parametersettings sind im Anhang 3 ersichtlich. Der Einfachheit halber wurde angenommen, dass die Welle durch die Reflexion an den Felswänden nicht abgeschwächt wird. Dieser pessimistische Ansatz ist im vorliegenden Fall für eine erste grobe Abschätzung vertretbar.

Die Parameter Fließgeschwindigkeit V , Eintauchhöhe h und Eintauchbreite b der Bergsturzmasse wurden aus den Simulationsresultaten extrahiert. Die Parameter

Eintauchwinkel, Auflaufwinkel, Ruhewassertiefe und Wellendistanz wurden mithilfe der Landeskarten ermittelt.

5.2.2 Druckwelle

Die Druckwelle wurde durch das SLF für die beiden Szenarien SZ4 und SZ5 simuliert. Das Modell wurde an sehr grossen Ereignissen, v.a. im Langtang-Tal in Nepal (Erdbeben 2016) aber auch Piz Cengalo (2018) kalibriert.

5.2.3 Murgang aus Bergsturzmasse

Die Berechnung der Prozessräume Murgang erfolgten mit RAMMS:DebrisFlow. Es wurde ausgehend von der Situation nach dem Bergsturzereignis SZ4 (8 Mio. m³) folgende beiden Szenarien jeweils mit einem pessimistischen und einem optimistischen Parametersetting gerechnet:

- Szenario Gewitterereignis HQ20: Das stark erosionsanfällige Bergsturzmaterial wird durch ein Gewitterereignis HQ20 erodiert und mobilisiert. Das Erosionspotential sowie die Reichweiten wurden mit dem RAMMS-Erosionsmodul modelliert. Diesem Szenario wird eine kleine Eintretenswahrscheinlichkeit attestiert.
- Szenario „häufiges“ Niederschlagsereignis: Es wird erwartet, dass aus den Bergsturzaflagerungen immer wieder durch regelmässig auftretende Niederschlagsereignisse kleine Murgänge (ca. 10'000 m³) ausgelöst werden. Die Reichweiten solch kleiner, jedoch häufiger Ereignisse werden ohne RAMMS-Erosionsmodul berechnet.

Szenario Gewitterereignis HQ20

Das Erosionspotential des stark erosionsanfälligen Bergsturzmaterials wurde mithilfe des RAMMS-Erosionsmoduls abgeschätzt. Das RAMMS Erosionsmodul wurde für ähnliche Fragestellungen z.B. auch im Val Bondasca (Bondo) bereits eingesetzt [2]. Für die Modellierungen wurden folgende Grundannahmen getroffen:

- Auslöseereignis: Gewitterereignis ca. HQ20 (mit HAKESCH Spitzenabfluss bei entsprechendem Gewitterereignis berechnet)
- Spitzenabfluss: 6.5 m³/s
- Initiales Volumen: 1000 m³, Dreiecksganglinie
- Topografie: Bergsturzaflagerungen aus SZ4 (8 Mio. m³), 2 m Auflösung
- Die Bereiche der Bergsturzaflagerung sind erodierbar, die restlichen Bereiche wurden als nicht erodierbar definiert

Da keine vergleichbaren Ereignisse in Kandersteg bekannt sind, konnte keine Kalibrierung im eigentlichen Sinne vorgenommen werden. Für die Modellkalibrierung wurden Analogieschlüsse zu ähnlichen Fragestellungen (z.B. Bondo) gezogen. Zudem wurde eine Sensitivitätsanalyse für die Inputparameter durchgeführt, um Aussagen über die Modellstabilität machen zu können. Nachfolgend sind die wichtigsten Resultate aus der Sensitivitätsanalyse sowie die daraus folgende Parameterwahl beschrieben.

- Der Parameter für Turbulenz ξ hat auf die Auslaufdistanz kaum einen Einfluss. Andererseits ist der Einfluss von ξ auf das aus der Bergsturزابlagerung mobilisierte Volumen relativ gross. Für die Modellierungen wurde $\xi = 200$ gewählt.
- Die basale Reibung μ wurde gemäss dem gängigen Verfahren anhand des Kegelgefälles bestimmt. Das Kegelgefälle beträgt beim Kegelhals rund 10% und nimmt danach auf ca. 4% ab. Für den Parameter μ wurde ein optimistischer Wert von 0.1 und ein pessimistischer Wert von 0.05 definiert.
- RAMMS verwendet einen empirischen Erosionsansatz, der den Murgang Material aufnehmen lässt, sobald eine entsprechend notwendige Sohlenschubspannung überschritten wird. Für das optimistische Parameterset wurden die empfohlenen Werte für die maximal mögliche Erosionsrate übernommen. Für die pessimistische Modellierung wurde die maximal mögliche Erosionsrate leicht erhöht, womit der Murgang mehr Material aus der Bergsturزابlagerung aufnehmen kann.
- Das resultierende Murgangvolumen für das optimistische Parameterset konnte mittels einer Geschiebeabschätzung nach Gertsch Desktop plausibilisiert werden. Das Murgangvolumen für das pessimistische Parameterset liegt leicht höher, was aufgrund der ausserordentlichen Rahmenbedingungen mit rund 8 Mio. m³ frischen Bergsturزابlagerungen allerdings ebenfalls plausibel erscheint.

Szenario häufiges Niederschlagsereignis

Erfahrungen aus früheren Ereignissen mit plötzlich deutlich erhöhter Lockermaterialverfügbarkeit zeigen, dass in der ersten Zeit nach dem Bergsturz auch bei sehr kleinen Niederschlagsereignissen oder durch die reine Verfügbarkeit von Schmelzwasser Murgänge ausgelöst werden können. Beispiele dafür sind Riascio, Bondo und weitere in [2] beschriebene. Die Ereignisgrösse für ein solches Szenario wurde gutachterlich auf ein Volumen von 10'000 m³ festgelegt. Es wurden dieselben optimistischen und pessimistischen Reibungsparameter verwendet, wie für

das Szenario Gewitterereignis. Als Inputhydrograph wurde eine Dreiecksganglinie gebildet mit Volumen $10'000 \text{ m}^3$ und Spitzenabfluss $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Spitzenabfluss liegt etwas tiefer als der nach Rickenmann [16] aus dem Murgangvolumen empirisch berechnete Spitzenabfluss. Wir gehen in der Bergsturzmasse von einem hohen Feinanteil aus, was in tendenziell feinkörnigen Murgängen resultiert, welche in der Regel einen kleineren Spitzenabfluss aufweisen, als die nach Rickenmann empirisch hergeleiteten Werte. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse mit einer Erhöhung des Spitzenabflusses auf $150 \text{ m}^3/\text{s}$ zeigte, dass der Einfluss des Spitzenabflusses in dieser Grössenordnung sehr gering ausfällt.

6. Modellierungsergebnisse

6.1 Bergsturz

Die Modellresultate pro Szenario sind in den Anhängen 1 und 2 einzusehen. Dargestellt ist jeweils die Ablagerungshöhe der Modellierungen mit optimistischen Parametern sowie die Prozessumhüllende der Modellierungen mit pessimistischen Parametern.

Bei einem Abbruchvolumen von 1 Mio. Kubikmetern beginnt die Bergsturzmasse zu „fliessen“. Die Modellresultate können aufgeteilt in zwei Kategorien („kleine“ und „grosse“ Ausbrüche) beschrieben werden.

Szenarien < 1 Mio. m^3 Volumen (kleine Abbrüche)

- Verhalten ähnlich zu grossen Blockschlägen
- Druckwellen vernachlässigbar
- Reichweite maximal bis Oeschibach
- Gebäude um Berghaus Oeschinensee erst ab SZ2 gefährdet
- KW Oeschibach ab SZ3 gefährdet
- Massenbewegung in Oeschinensee ab SZ2 möglich
- Impulswelle aus See ist höchstens relevant für Folgeprozesse (Murgang)
- Prozesskette: unmittelbarer Murgang nur bei ausserordentlicher (Vor-) Feuchte möglich (Frühling mit Schnee)

Szenarien > 1 Mio. m^3 Volumen (grosse Abbrüche)

- Aufbrandung der Sturzmassen am Gegenhang
- Fliessprozess entlang Oeschibach bis maximal Siedlungsrand

- Druckwelle entscheidend für gesamten Bereich Oeschinensee - Bergstation Oeschinenbahn
- Unsicherheiten in der Modellierung liegen im Wesentlichen im Fließverhalten entlang Oeschibach
- Impulswelle ist nicht relevant
- Prozessketten und Folgeprozesse (Murgang) wahrscheinlich

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigte, sind die Unsicherheiten der Modelle „überschaubar“ (vgl. auch Kapitel 5.1.1). Bei allen Abbruchszenarien ist der Wasseranteil in der Sturzmasse für das „Verhalten“ im Tal entscheidend. Die Druckwellen werden erst bei sehr grossen Volumina (SZ3 – SZ5) relevant. Die Impulswelle aus dem Oeschinensee ist aufgrund Volumenüberlegungen wenn überhaupt nur bei kleinen Szenarien (SZ2 und SZ3) von Belang.

6.2 Sekundärprozesse

6.2.1 Impulswelle

Die Berechnung (vgl. Anhang 3) zeigt, dass die Wellenausbreitungen bei der 2D-Methode tendenziell höher sind als bei der 3D-Methode. Dies rührt daher, dass sich die Impulswellen bei der 3D-Berechnung auf eine grössere Fläche verteilt und so schneller Energie und somit an Höhe verlieren.

Das heutige Freibord (ohne Ablagerungen) bei der Einmündung vom Oeschisee in den Oeschibach beträgt 5.5 m. Dieses wird bei optimistischer Parameterwahl (Geschwindigkeit, Dichte, Rutschgeometrie) nur knapp überströmt. Werden die Parameter hingegen pessimistisch gewählt, so ist die Auflaufhöhe deutlich höher als das vorhandene Freibord.

Die Berechnungen zeigen, dass mit Wellenhöhen von 3 bis 6 m zu rechnen ist und die Auflaufhöhe voraussichtlich 5 bis 15 m betragen. Diese Werte sind unter den in Kapitel 5.2.1 beschriebenen vereinfachten Annahmen als sehr pessimistisch zu bezeichnen. Dies umso mehr, da aufgrund des Verhältnisses der Rutschmasse zum Seevolumen sowie aufgrund des flachen Eintauchwinkels einige Modellbedingungen verletzt wurden. Die Modellinputs befinden sich somit teilweise ausserhalb des angegebenen Gültigkeitsbereichs. Dadurch sind die Resultate vorsichtig zu interpretieren und nur als Worst-Case Grössenordnung zu verstehen.

Fazit: Ein Überschwappen des Oeschinensees bei einem Sturzereignis in den See ist möglich. Für den Gesamtprozessablauf ist dies jedoch nur im Frühling bei viel Schnee und Schmelzwasser relevant.

6.2.2 Druckwelle

Die Druckwelle (vgl. Anhang 4) reicht beim SZ3 bis knapp zum KW sowie der Bergstation der Oeschinenbahn; beim SZ5 umfasst die Druckwelle den gesamten Bereich vom Oeschinensee bis zur Linie Rendez-vous – Ide Huble – Bire. Die freigesetzten Energien sind dabei absolut zerstörend.

6.2.3 Murgang aus Bergsturzmasse

Szenario Gewitterereignis HQ20

Der Murgang als Sekundärprozess aus der Bergsturzablagerung erreicht in etwa die Ausdehnung (vgl. Anhang 5.1), welche auch in der Gefahrenkarte Wasser als Zone mit mittlerer Gefährdung ausgeschieden wurde. Diese Ausdehnung wird aufgrund des grossen Lockermaterialangebotes allerdings bereits bei deutlich häufigeren Gewitterereignissen erreicht, als dies in der Gefahrenkarte berücksichtigt wurde. Zudem handelt es sich in den vorliegenden Szenarien um Murgangereignisse, während die Gefahrenkarte lediglich von Überschwemmung und Übersarung ausgeht. Je nach getroffenen Grundannahmen für die Modellierung sind vor allem im Bereich linksufrig des Oeschibachs möglicherweise relativ viele Gebäude vom Murgang betroffen. Die Modellierung mit RAMMS zeigt nur die Ausdehnung des Prozesses Murgang, welcher bei sehr flachen Verhältnissen abrupt stoppt. Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass die Prozesse Übersarung und Überschwemmung noch deutlich weiter reichen werden und durch diese Modellierungen nicht abgebildet sind. Diese Prozesse können grosse Sachschäden verursachen, sind allerdings für das Personenrisiko deutlich weniger relevant als der Prozess Murgang.

Szenario häufiges Niederschlagsereignis

Die Ausdehnung der häufigen Murgangereignisse (vgl. Anhang 5.2) ist annähernd gleich gross wie diejenige für das Szenario Gewitterereignis HQ20. Dies liegt an der Kegelgeometrie, welche den Prozess Murgang massgeblich beeinflusst: Ab dem Punkt, bei dem der Kegel eine gewisse Längsneigung unterschreitet, ist ein Weiterfliessen der Masse als Murgang physikalisch kaum mehr möglich. Die Intensität der Murgänge aus dem Szenario häufiges Niederschlagsereignis ist allerdings

deutlich geringer als die Intensität der Murgänge aus einem Gewitterereignis HQ20, was auf das verfrachtete Murgangvolumen zurückzuführen ist.

Es ist jedoch bei häufigen Ereignissen davon auszugehen, dass mehrere Schübe auftreten. Diese verfüllen die vorhandenen Rückhalteräume schnell und müssen daher zwingend in die Notfallplanung integriert werden. Zudem gilt es auch bei den häufigen Ereignissen, die Prozesse Überschwemmung und Übersarung, welche ausserhalb des Prozessbereichs des Murgangs noch auftreten werden, möglichst schadlos in die Kander abzuleiten.

7. Diskussion und Unsicherheiten

Die grössten Unsicherheiten liegen in der Szenarienbildung der grossen Sturzprozesse. Die möglichen Gleitflächen sind nicht bekannt. Es kann zum heutigen Zeitpunkt auch nicht ausgeschlossen werden, dass die grossen Massen als gesamtes Paket abstürzen. Dies bedingt, dass vorderhand mit vielen doch eher pessimistischen Annahmen in der Umsetzung gerechnet werden muss. Es gilt im Verlaufe des Sommers diese Unsicherheiten in der geologischen Disposition mit einem Basissmonitoring und gezielten Feldbegehungen und Analysen zu minimieren.

Die Modellierungen der Primärprozesse zeigen trotz den grossen Unsicherheiten in den Szenarien und der Parametrisierung ein relativ einheitliches Bild. Ab einem Abbruchvolumen von rund 1 Mio. m³ verändert sich das Erscheinungsbild der Ablagerungen – grosse Volumina (> 1 Mio. m³) fliessen entlang des Oeschibaches talwärts bis an den Siedlungsrand. Die pessimistische Modellierung des Szenarios 5 (15 Mio. m³) stellt das Endglied einer Aufsummierung pessimistischer Annahmen dar. Wir erachten es daher als sehr wenig wahrscheinlich, dass wie in den Modellierungen gezeigt (vgl. rote Linie in Anhang 1.6/1.7), Teile des Siedlungsgebietes durch den Primärprozess betroffen sein können.

Die Murgangssituation des Oeschibaches ist bekannt und wird in der Gefahrenkarte (GK) abgebildet [3]. Die GK bildet die Grundlage für die heute existierende Notfallplanung. Die Prozesse werden sich mit grosser Wahrscheinlichkeit dahingehend ändern, dass bei vorhandenen Sturzablagerungen bereits bei kleinen Niederschlagsmengen sehr häufig kleine Murgangereignisse auftreten werden. Das ebenfalls gezeigte Worst-Case Szenario des Gewitterereignisses HQ20 (Anhang 5.1) birgt viele Unsicherheiten und kann nur mit vorzeitigen Evakuationen beherrscht werden.

Es kann damit auch bei den Sekundärprozessen Murgang festgehalten werden,

dass die Resultate trotz der vorhandenen Unsicherheiten genügend aufschlussreich für die Etablierung eines Gefahrenmanagements sind.

Eine wichtige Unsicherheit besteht darin, in welchem Ausmass ein energiereicher Impakt eines Bergsturzes „Spitze Stei“ einen unmittelbaren Murgang auslösen könnte. Dazu sind aus unserer Sicht folgende Überlegungen zur Charakterisierung der Talfüllung und des Sturzmaterialies notwendig.

Die Talfüllung besteht aus einer heterogenen Abfolge von Moränenmaterial, altem Bergsturzmateriel, Gehänge- bzw. Bachschutt. Die Moräne ist dicht gelagert, vermutlich glazial vorbelastet und überkonsolidiert. Dadurch ist dieses Material kaum erschütterungsempfindlich und aufgrund der geringen Speicherkapazität (Porenraum) wasserarm. Das darüber liegende Bergsturzmateriel ist chaotisch gelagert mit sehr heterogener Korngrössen- und Porenraumverteilung. Dadurch ist das Vorhandensein eines zusammenhängenden Grundwasserspiegels unsicher bzw. unwahrscheinlich. Der Gehänge- und Bachschutt ist kiesig bis sandig mit Blöcken. Es handelt sich um ein korngestütztes Medium, in dem sich ein mehr oder weniger zusammenhängender Grundwasserspiegel aufbauen kann. Die maximale Porosität schätzen wir auf rund 30%.

Die potentiellen Sturzmassen des „Spitzen Stein“ setzen sich wie folgt zusammen. Im Top liegen die geschichteten, geklüfteten Öhrlikalke. Beim Sturzprozess wird dieses Materiel durch die fahrend-gleitende Sturzbewegung im Transitgebiet (Länge von knapp 1'300 m) stark fragmentiert. Dadurch wird der Absturz über die unterste Steilstufe als mehr oder weniger ausgedehnter Schuttstrom erfolgen. D.h. dass der Impakt der Masse auf die Talfüllung (primär schräger Impakt) nicht als kompaktes Massenpaket erfolgen wird. Das eher feinkörnige Materiel der darunter folgenden Tonschiefer der Zementsteinschichten wird durch die Sturz- und Gleitbewegung ebenfalls stark fragmentiert, allenfalls sogar zu feinkörniger Fraktion zerrieben. Der Absturz über die Felsstufen disaggregiert die Sturzmassen weiter, wobei sich durch die Aufnahme von Luft eine mehr oder weniger starke Staubwolke bilden wird. Dadurch erfolgt der Impakt auf den Schuttfächer nicht in kompakter Form. Die Lockergesteinsbedeckung inkl. Blockgletscher im Transitgebiet besteht aus lokalem Gehängeschutt und mehr oder weniger eisreichem Moränen-/Blockgletschermateriel. Durch den Sturzprozess wird dieses Materiel mitgenommen bzw. abgeschürft. Der Absturz über die Felsstufe erfolgt ebenfalls als Schuttstrom in mehr oder weniger „verdünnter“ Form.

Bei einem theoretischen Einschlag der Gesamtmasse auf die Talfüllung in mehr oder weniger kompakter Form vor, stellt sich die Frage der möglichen Extraktion von Wasser aus dem Porenraum. Dazu sind folgende Überlegungen nötig: Das

kiesig sandige Material stellt durch seine komponentengestützte Matrix ein wenig kompaktierbares Medium dar. Entsprechend ist davon auszugehen, dass nur ein inelastischer Stoss einer kompakten Masse (Stempelwirkung) eine massgebliche Expulsion von Grundwasser auslösen könnte. Weiter ist die mögliche Ausbildung eines ausgedehnten Scherbruches im steilen Gehängeschutt zu diskutieren (Böschungsversagen). Das dadurch allfällig freiwerdende Porenwasser könnte im steilen Gerinne des Oeschibaches zu geschiebereichem Abfluss führen. Dabei wird jedoch die Ausbildung eines Murganges aufgrund der primär vorhandenen Korngrössenverteilung als wenig wahrscheinlich erachtet.

Aufgrund dieser Überlegungen erachten wir einen unmittelbaren Murgang als Folge des Bergsturzimpaktes als wenig wahrscheinlich.

8. Sicherheitszonen Primärprozesse

Die Modellierungen zeigen die Gefahrengebiete deutlich auf. Die Intensitäten der verschiedenen Prozesse sind in jedem Fall sehr gross bis extrem gross. Im Gefahrenmanagement gilt es, die gefährdeten Gebiete frühzeitig abzusperren respektive zu evakuieren.

Das geologische Modell geht von generell grossen Abbrüchen aus, welche sich über wenige Tage bis allenfalls Wochen ankündigen werden. Kleine Abbrüche von wenigen 1'000 m³ bis einigen 10'000 m³ Volumen können hingegen spontan und ohne grosse Vorwarnzeit erfolgen. Das Monitoring ist heute so ausgelegt, dass Abbrüche von wenigen 10'000 m³ Volumen im schlimmsten Fall gar nicht registriert werden. Eine Bewegungszunahme eines Paketes von gegen 100'000 m³ wird jedoch registriert. Ab einem Abbruchvolumen im Bereich von 1 Mio m³ verändert sich das „Fließverhalten“ der Sturzmasse von einem einfachen Absturz hin zu einer lawinenartigen Fließbewegung entlang des Oeschibaches.

Diese Randbedingungen gilt es bei der Ausscheidung der Sicherheitszonen für den Primärprozess Bergsturz zu beachten. Basierend auf diesen Überlegungen wurden drei Sicherheitszonen ausgeschieden (vgl. auch Anhang 6).

a) Generelle Sicherheitszone (dauerhafte Absperrung)

Die generelle Absperrung umfasst das Gebiet um den Holzspicherwald. Dort sind jederzeit Stein- und Blockschläge sowie Abgänge von Felssturzpaketen von mehreren 10'000 m³ bis zu 100'000 m³ möglich (vgl. Abbildung 5). Uferbereiche des Oeschinensees, die Gebäude des Hotel Oeschinensee sowie der Holzspicher und

alle Zufahrtsstrassen und Wanderwege liegen ausserhalb dieser generellen Abspernung.

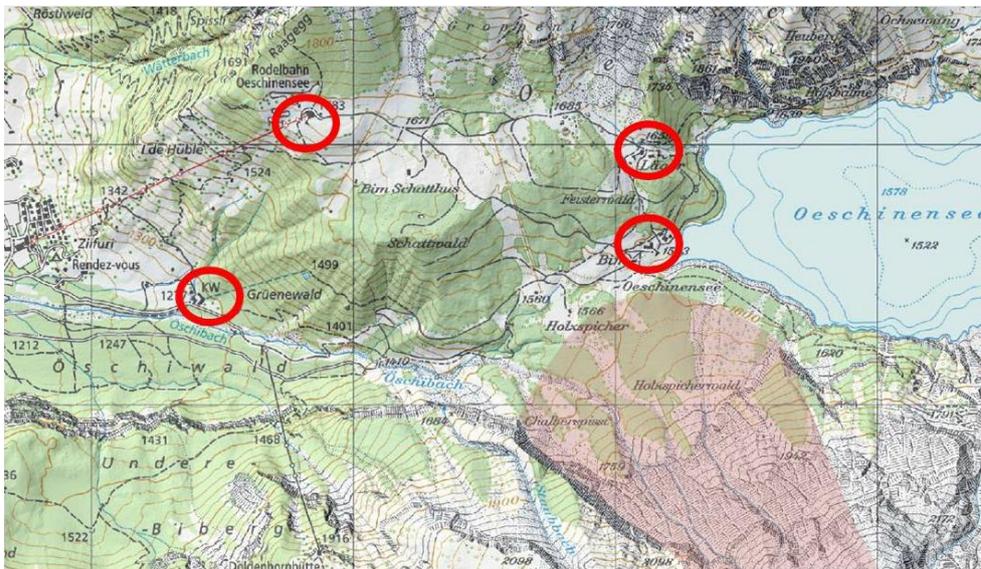


Abbildung 5: Generelle Abspernung für kleinere, häufige Ereignisse (rote Fläche). Rote Kreise: Orientierungshilfen.

b) Sicherheitszonen ≤ 1 Mio. m^3

Bei einem drohenden Abbruch von maximal 1 Mio. Kubikmeter Volumen wird das Gebiet beidseits des Oeschibachs entlang der Linie KW - Schattwald - Läger gesperrt (vgl. Abbildung 6). Das Kraftwerk und das nahegelegene Wohnhaus liegen ausserhalb dieser Abspernzonen. Das Hotel Oeschinensee, die Gebäude bei Läger, der Holzspicher sowie die Zufahrtsstrassen müssen gesperrt werden. Die gesamten Uferbereiche des Oeschinenensees gilt es abzusperren, da je nach Abbruch mit Flutwellen zu rechnen ist. Es muss sichergestellt werden, dass keine Personen ab der Bergstation der Sesselbahn und aus Richtung Unter- und Oberbärgli sowie Hochtürli via Holzbalme in den Perimeter der Sicherheitszone gelangen können. Der Weg via Heuberg ist noch gefahrlos begehbar. Die Zugänge zur Fründenhütte des SAC fallen in den Abspernbereich. Eine grosse Druckwelle ist bei diesem Szenario noch nicht zu erwarten.

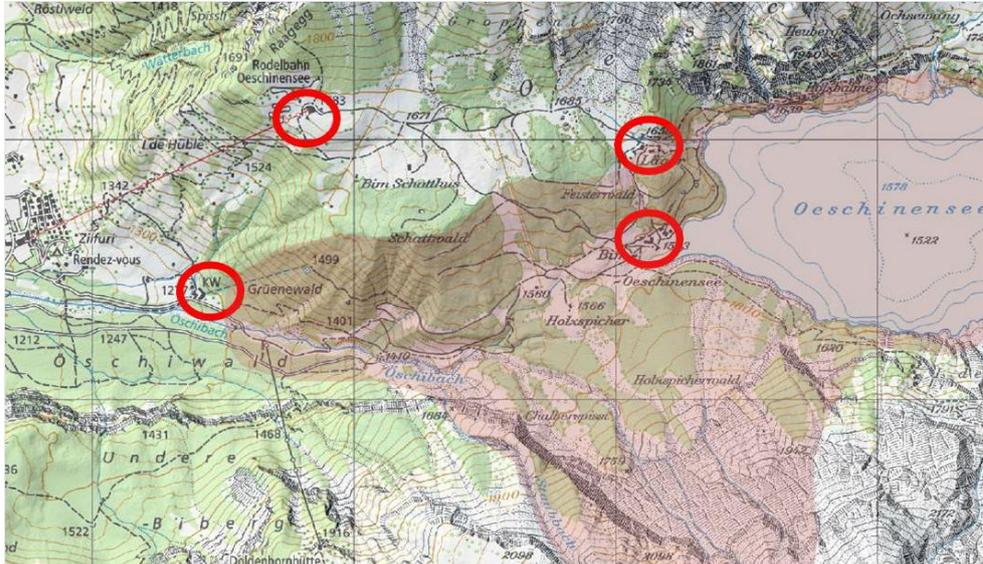


Abbildung 6: Sicherheitszone bei Abrüchen bis zu 1 Mio. m³ (rote Fläche). Rote Kreise: Orientierungshilfen.

c) Sicherheitszonen > 1 Mio. m³

Bei einem sich ankündigenden Abbruch von mehr als einer Million Kubikmeter Volumen wird das gesamte Gebiet östlich von der Linie Oeschiwald – Die Huble – Bergstation Oeschibahn als Sicherheitszone erklärt (vgl. Abbildung 7). Ausschlaggebend für die grosse Zone sind hier neben der ausserordentlichen Reichweite des Sturzprozesses vor allem die Druckwelle im Gebiet Oeschinensee – Sesselbahn. Zugänge zu den drei SAC Hütten (Doldenhorn-, Fründenhorn- und Blüemlisalpütte) fallen ebenfalls in den kritischen Bereich.

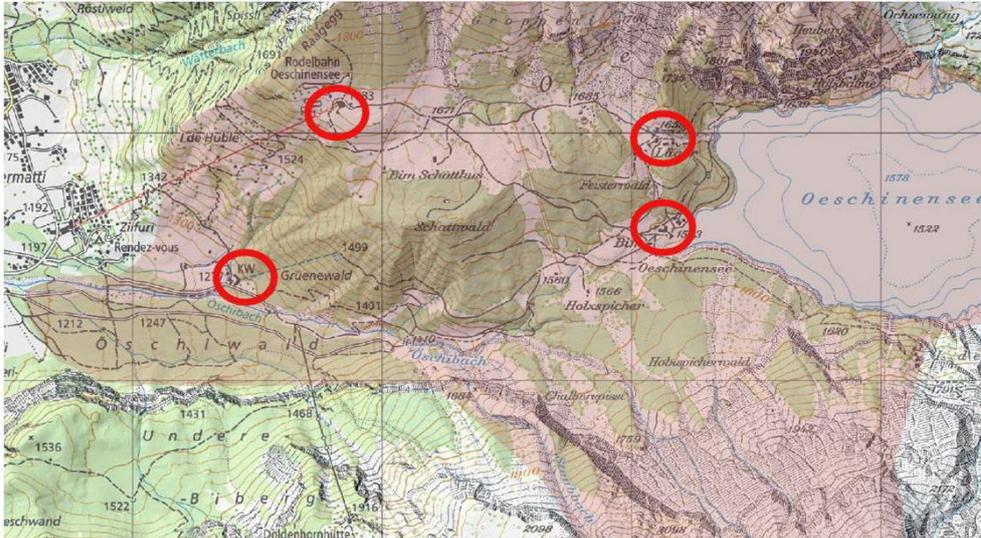


Abbildung 7: Sicherheitsgebiet für Abrüche > 1 Mio. m³ (rote Fläche). Rote Kreise: Orientierungshilfen.

9. Monitoringkonzept Primärprozesse

Das Monitoring bildet zusammen mit den definierten Gefahrenstufen (vgl. Anhang 7) ein Eckpfeiler im gesamten Gefahrenmanagement. So werden u.a. die Gefahrenstufen direkt aus dem Monitoring abgeleitet und auch die Szenarien werden im Wesentlichen via Monitoring definiert.

Das Gebiet um den „Spitze Stei“ oberhalb des Oeschinensees wird seit Mitte 2018 überwacht, nachdem grössere Felsbewegungen beobachtet wurden [10]. Auf Grund der zu erwartenden Entwicklung, kann das aktuelle Monitoring, bestehend aus einer periodischen geodätischen Vermessung, kombiniert mit vier permanent gemessenen GPS-Punkten, den Ansprüchen des Gefahrenmanagements nicht mehr gerecht werden und muss deshalb adäquat ausgebaut werden.

9.1 Ausbau bisheriges Monitoring auf Basismonitoring

Das bestehende Monitoring soll so ausgebaut werden, dass mehr oder weniger kontinuierliche Messresultate verfügbar werden. Die Daten müssen vertrauenswürdig (hohe Genauigkeit) und redundant sein. Ein Ausbau des Messnetzes im Falle einer Zunahme der Bewegungen muss möglich sein. Flächig erfasste Deformationsdaten sind für das „Basismonitoring“ unseres Erachtens nicht notwendig.

In einem ersten Schritt schlagen wir den folgenden Ausbau vor:

1. Verdichtung der geodätischen Messpunkte mit 10 zusätzlichen Reflektoren, damit Kubaturen und allenfalls einzelne Bereiche unterschiedlicher Geschwindigkeit besser evaluiert werden können. Nullmessung.
2. Ergänzung von 3 GPS-Messpunkten auf dem Geländerücken mit den im letzten Sommer grössten Bewegungsraten
3. Anbringen von 2 Erschütterungsmessgeräten im obersten, felsigen Teil der bewegten Masse als weitere Informationsquelle (Zunahme der Bodenunruhe). Die Geräte werden vom KAWA gratis zur Verfügung gestellt, jedoch ohne Datenübermittlung.
4. Automatisierung der geodätischen Messungen, damit mehrheitlich kontinuierliche Daten produziert werden können (Wyss & Früh AG). Den Datenausfall bei schlechter Witterung (Nebel, Regen) kann im Rahmen des Monitoringkonzeptes verkraftet werden.
5. Installation einer hochauflösenden Kamera bei Pt. 2'098 m ü. M., östlich der Doldenhornhütte, damit wir einen weiteren Blick aus unterschiedlicher Perspektive auf die Rutschmasse haben. Im Bedarfsfall kann die Kamera-Beobachtung mit einer automatisierten Bildanalyse zur Bestimmung der Bewegungsintensitäten ergänzt werden.
6. Einrichtung eines Datenportals (GEOPRAEVENT AG) auf welchem alle Messdaten zentral verwaltet und ersichtlich sind inkl. Datenübermittlung der Erschütterungsmessgeräte.
7. Betrieb aller Messungen und des Datenportals

Der oben erwähnte Ausbau bedingt die Installation einer fixen Konsole in der Nähe des heutigen Messstandortes sowie die Bereitstellung einer Stromquelle (kann direkt vom Skilift zum Standort gezogen werden). Bei dieser Gelegenheit erachten wir es als sinnvoll, auch die Fixation für die mögliche Positionierung eines INSAR-Radars (siehe Ausbau im Eskalationsfall) zu erstellen (wetterunabhängige, hochauflösende und flächige Bewegungsüberwachung im Krisenfall).

9.2 Ausbau im Eskalationsfall

Im Eskalationsfall, d.h. bei einer Beschleunigung einer grossen Masse, werden vermutlich einzelne geodätische Messpunkte wegfallen, bzw. zerstört werden. Aufgrund der erhöhten Gefährdung ist ein Ersatz evtl. nicht mehr möglich. Das Monitoringkonzept ist so aufgebaut, dass das Basismonitoring zu einem Warnsystem ausgebaut werden kann. D.h. wenn nicht nur mehr Punktinformationen sondern flächige Daten generiert werden und dies für die Warnung bei jeder Witterung. Dabei stehen, je nach Eskalationsstufe, verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

- Automatische Bildauswertung der Kamerabilder Doldenhornhütte, zusätzliche hochaufgelöste Kamera beim Messstandort. Es werden Flächeninformationen verfügbar, jedoch nur bei guten Witterungsverhältnissen.
- Laserscanner beim Messstandort. Es werden hochaufgelöste Flächeninformationen verfügbar, jedoch nur bei guten Witterungsverhältnissen.
- Radarmessungen ab Messstandort. Hochaufgelöste Flächeninformationen bei jeder Witterung

Die Kosten für diese Methoden sind um Grössenordnungen höher als der Ausbau des Basismonitoring und müssen im Bedarfsfall detailliert zusammengestellt werden.

9.3 Gefahrenmanagement

Die Hauptarbeit beim Gefahrenmanagement bildet die tägliche Konsultation und Analyse der Messdaten sowie das wöchentliche Reporting im Datenportal (Gefahrenstufen 1 und 2). Bei einem Wechsel der Gefahrenstufe (ab Stufe 3) werden Empfehlungen mit dem KAWA diskutiert. In Stufe 4 und 5 ist ein tägliches Reporting resp. sind Interventionen vor Ort notwendig.

Das Gefahrenmanagement kann nur mit einer klar geregelten Pikettorganisation vorgenommen werden. Es müssen Zuständigkeiten definiert und kommuniziert werden. Das Krisenmanagement erfolgt zusammen mit dem KAWA.

10. Schlussbemerkungen

Die grössten Unsicherheiten liegen, wie bereits erwähnt, im geologischen Modell. Es gilt im Rahmen von weiterführenden Arbeiten und Analysen nach der Schneeschmelze (u.a. Geländebegehung, Erstellung eines 3D-Modelles) diesbezüglich weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Im Rahmen der Bearbeitungen in Phase A und B wurde die Abteufung einer Bohrung im Bereich Spitze Stei in Betracht gezogen, jedoch aufgrund der nach wie vor grossen Bewegungen und den vielen Unsicherheiten wieder verworfen. Damit werden die Feldanalysen, die neuen Daten aus dem Monitoring sowie ergänzende geophysikalische Messungen der Uni FR und terrestrische INSAR-Radar-Messungen wichtige Grundlagen für das Prozessverständnis resp. für die Verfeinerung des geologischen Modelles bilden.

Aufgrund der vorhandenen Temperaturabhängigkeit der Bewegungen [10] wird davon ausgegangen, dass eine erste Beschleunigung der Felsmassen bereits im Ap-

ril eintreten könnte. Es gilt daher die Notfallplanungen für die häufigen Szenarien Murgang entsprechend voranzutreiben. Die GEOTEST AG kann die Gemeinde in diesem Bereich gerne unterstützen. Auch die Organisation der Absperrung der Sicherheitszonen muss durchgespielt und entsprechend vorbereitet werden.

In Anbetracht der zu erwartenden Entwicklung erachten wir es als unerlässlich, dass das Monitoring so rasch wie möglich automatisiert wird. Mit einer kontinuierlichen Datenerfassung und -aufzeichnung können wichtige Erkenntnisse über das Verhalten der Rutschmasse gewonnen werden, und das Gefahrenmanagement kann mit jeder neuer Erkenntnis verbessert werden.

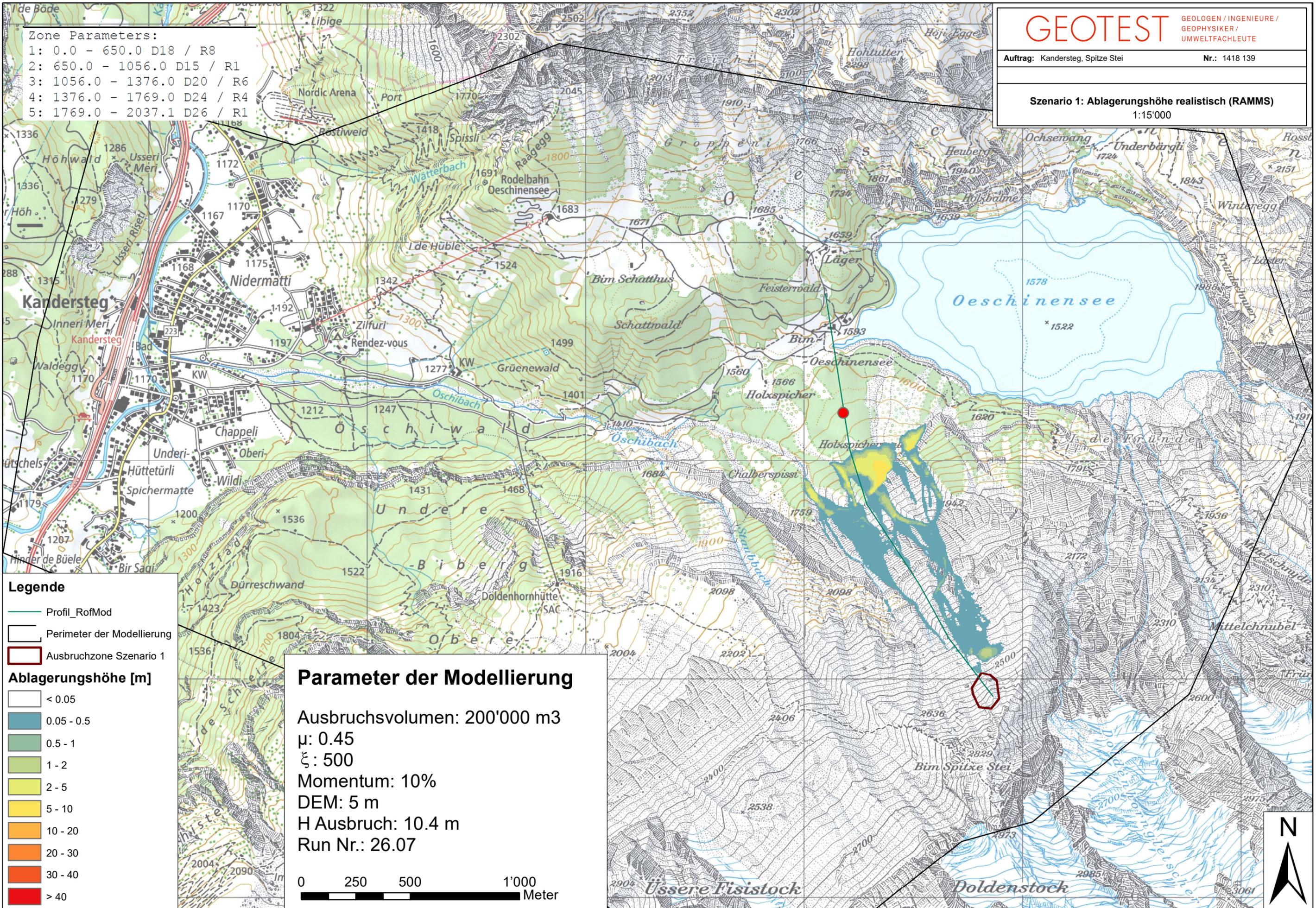
11. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] ARGE GEOTEST/geo7 (2015): Oberingenieurkreis I, KAWA, Abt. Naturgefahren: GHKperiGlazial, Berner Oberland – Phase II, Schlussbericht Resultate vom 27.02.2015 (Bericht Nr. 1412072.4).
- [2] P. Baer (2015): Veränderte Murgangaktivität nach plötzlichem Sediment-Input: Trigger- und Ereignisanalyse der Fallstudie Val Bondasca (GR) und Modellierung mittels RAMMS Erosionsmodell. Masterarbeit am geografischen Institut der Universität Zürich.
- [3] GEOTEST AG (2016): Kandersteg, Revision Gefahrenkarte, Gefahrenkarte und technischer Bericht Nr. 1415008.1 zur Gefahrenkarte, 327 S.
- [4] GEOTEST AG (2018): Grindelwald, Bergsturzmodellierung Schlossplatte, Bericht Nr. 1417067, Zollikofen.
- [5] GEOTEST AG (2019): Kandersteg, „Spitze Stei“, Resultate Phase A - Abschätzungen Primärprozesse, Präsentation vom 15.02.2019, Zollikofen, 31 Folien.
- [6] GEOTEST AG (2019): Kandersteg, „Spitze Stei“, Gefahrengrundlagen und –management, Präsentation vom 18.03.2019, Zollikofen, 22 Folien.
- [7] Grämiger, L. (2012): Prehistoric rock avalanches at Rinderhorn, Switzerland. Master's Thesis, ETH Zürich, 2012.
- [8] Heller, V., Hager, W.H. und Minor, H.-E. (2008): Rutscherzeugte Impuls- wellen in Stauseen, Grundlager und Berechnung. VAW: Zürich.
- [9] Jordan, B.A. (2017): Advancement and calibration of a 3D numerical model for landslide runout analysis. Doctor thesis, University of British Columbia, 2017.
- [10] KAWA (2018): „Spitze Stei“ Kandersteg, Grundlagebericht Gefahrenmanagement vom 17.12.2018, Interlaken, 39 S.
- [11] KAWA (2018): Fotoaufnahmen „Spitze Stei“, Befliegung vom 21.08.2018.
- [12] Knöpfli, P. et. al. (2018): The Oeschinensee rock avalanche, Bernese Alps, Switzerland: a co-seismic failure 2300 years ago? Swiss Journal of Geoscience, doi: 10.1007/s0015-017-0293-0.
- [13] Knapp et al. (2018): Multistage Rock-Slope failures revealed in lake sediments in a seismically active alpine region (Lake Oeschinen, Switzerland), Journal of geophysical research: Earth Surface, 10.1029/2017JF004455.
- [14] Krebs, J. (1925): Geologie der Blümlisalpgruppe; Beiträge zur geol. Karte der Schweiz, N.F. Liefg.54
- [15] Nagelisen, J. et al: Post-glacial rock avalanches in the Obersee Valley, Glarner Alps, Switzerland. J. Geomorphology, Volume 238, 1 June 2015, Pages 94-111, 2015.

- [16] Rickenmann D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards Journal* 19: 47-77.
- [17] Steinemann, S. (2012): Simulation of rock mass failure runout with RAMMS, WSL, Short reports 20.04.2012, 20.06.2012, 29.06.2012 and final report 26.10.2012.
- [18] Preuth, T. et al (2010): A random kinetic energy model for rock avalanches: Eight case studies, *Journal of geophysical research*, vol. 115, F03036; doi: 10.1029/2009JF001640, 2010.
- [19] Allen, S. K. et. al. (2009): First approaches towards modelling glacial hazards in the Mount Cook region of New Zealand's Southern Alps, *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 9, 481-499, 2009.
- [20] Vollmer, M. (2017): Sumulación numérica de la avalancha de roca del 21 de abril de 2007 en Punta Cola, región de Aysén, Chile, Memoria para optar al título de geóloga, 2017.
- [21] Walter, P. (2013): Evaluation of methods for run-out prediction of small and large scale rock avalanches – based on the example of Cuolm Da Vi at Sedrun, Bachelor thesis ETH Zürich, June 2013.

Zone Parameters:

- 1: 0.0 - 650.0 D18 / R8
- 2: 650.0 - 1056.0 D15 / R1
- 3: 1056.0 - 1376.0 D20 / R6
- 4: 1376.0 - 1769.0 D24 / R4
- 5: 1769.0 - 2037.1 D26 / R1



Legende

- Profil_RofMod
- Perimeter der Modellierung
- Ausbruchzone Szenario 1

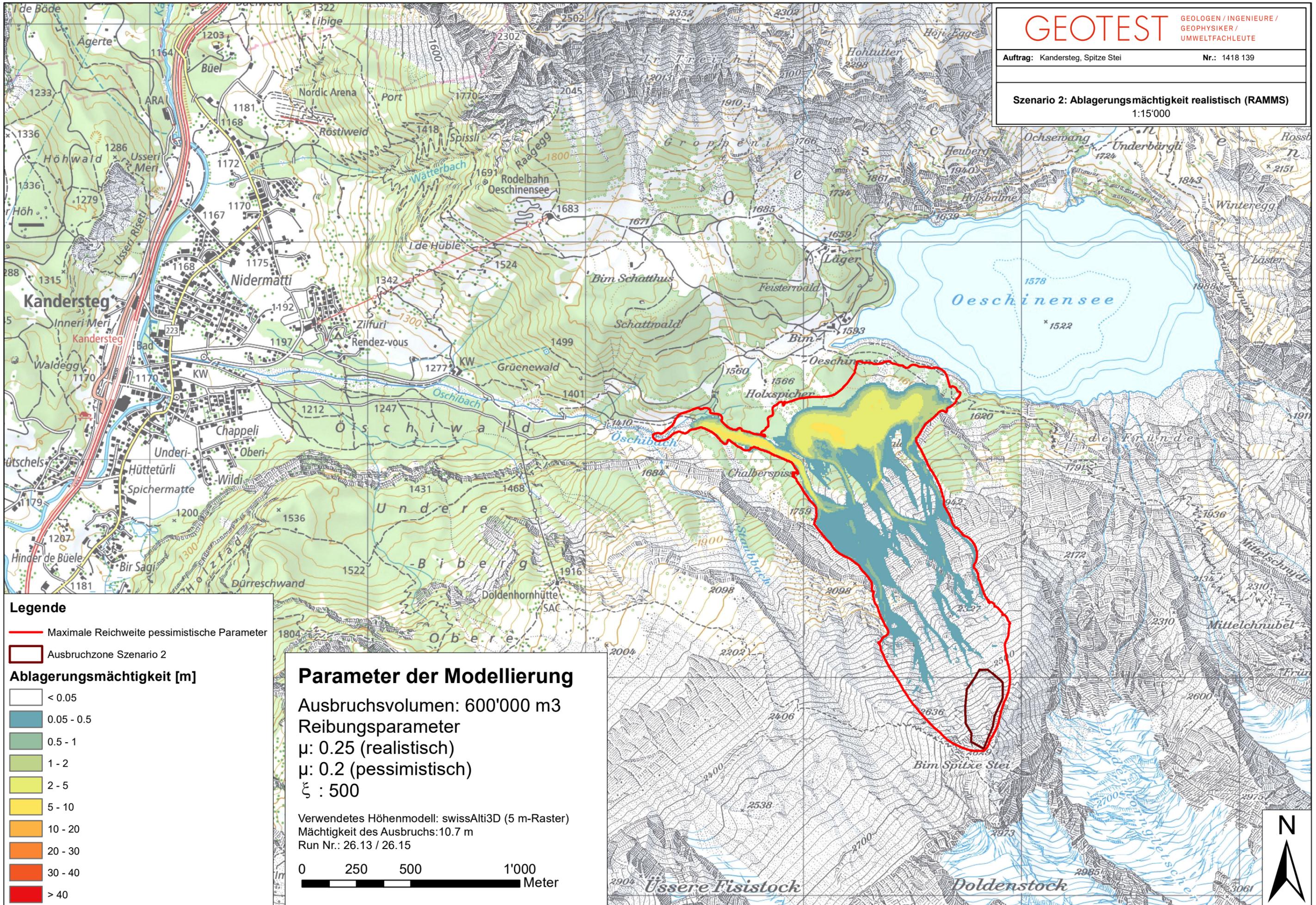
Ablagerungshöhe [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 200'000 m³
 μ : 0.45
 ξ : 500
 Momentum: 10%
 DEM: 5 m
 H Ausbruch: 10.4 m
 Run Nr.: 26.07





Legende

— Maximale Reichweite pessimistische Parameter

▭ Ausbruchzone Szenario 2

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 600'000 m³

Reibungsparameter

μ : 0.25 (realistisch)

μ : 0.2 (pessimistisch)

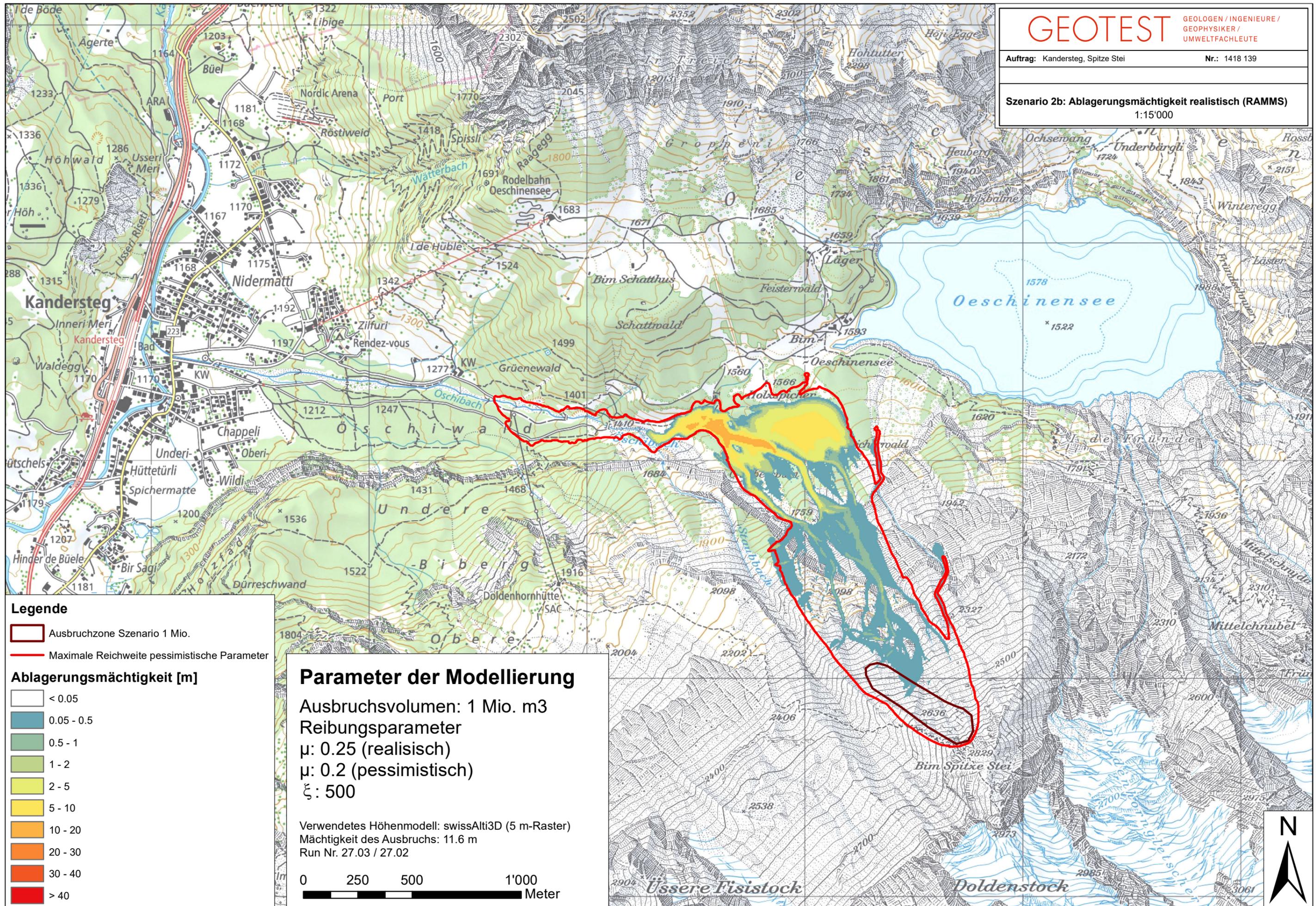
ξ : 500

Verwendetes Höhenmodell: swissAlti3D (5 m-Raster)

Mächtigkeit des Ausbruchs: 10.7 m

Run Nr.: 26.13 / 26.15

0 250 500 1'000
Meter



Legende

- Ausbruchzone Szenario 1 Mio.
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 1 Mio. m³

Reibungsparameter

μ : 0.25 (realistisch)

μ : 0.2 (pessimistisch)

ξ : 500

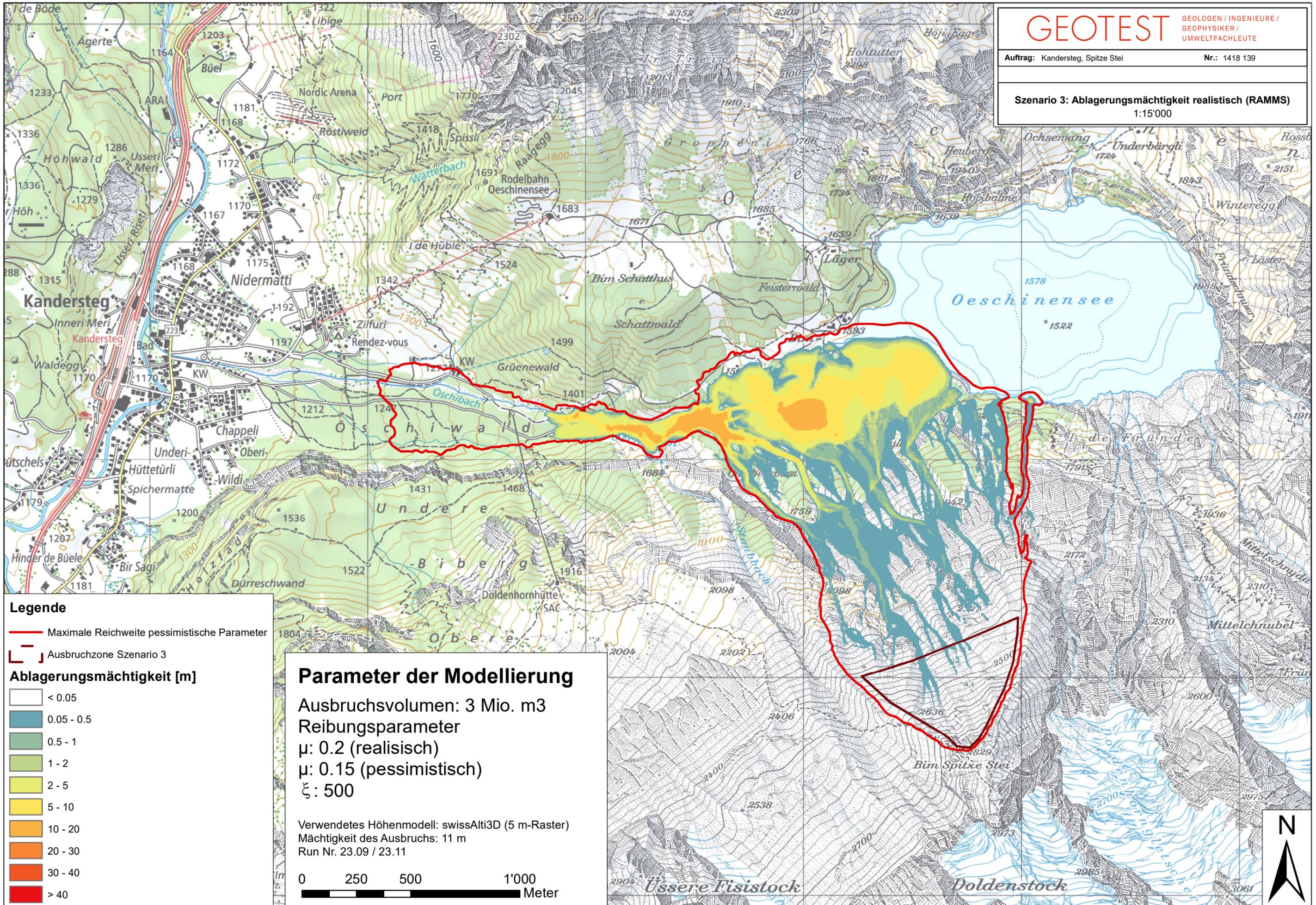
Verwendetes Höhenmodell: swissAlti3D (5 m-Raster)

Mächtigkeit des Ausbruchs: 11.6 m

Run Nr. 27.03 / 27.02

0 250 500 1'000
Meter



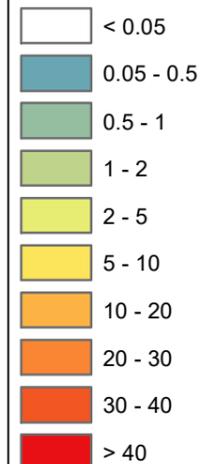


Legende

— Maximale Reichweite pessimistische Parameter

┌└ Ausbruchzone Szenario 3

Ablagerungsmächtigkeit [m]



Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 3 Mio. m³

Reibungsparameter

μ : 0.2 (realistisch)

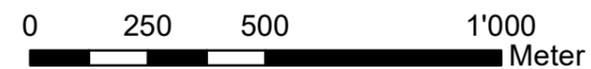
μ : 0.15 (pessimistisch)

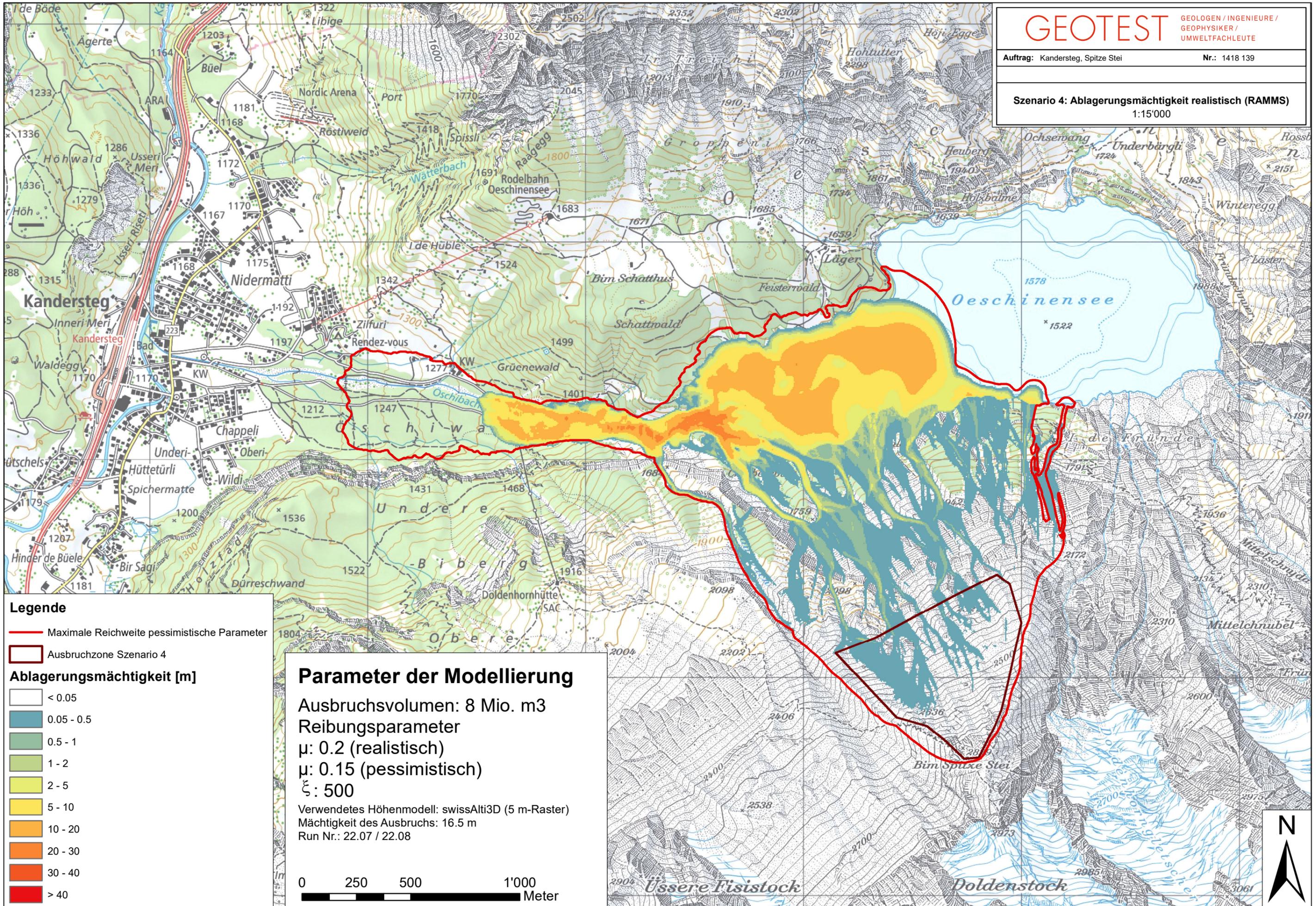
ξ : 500

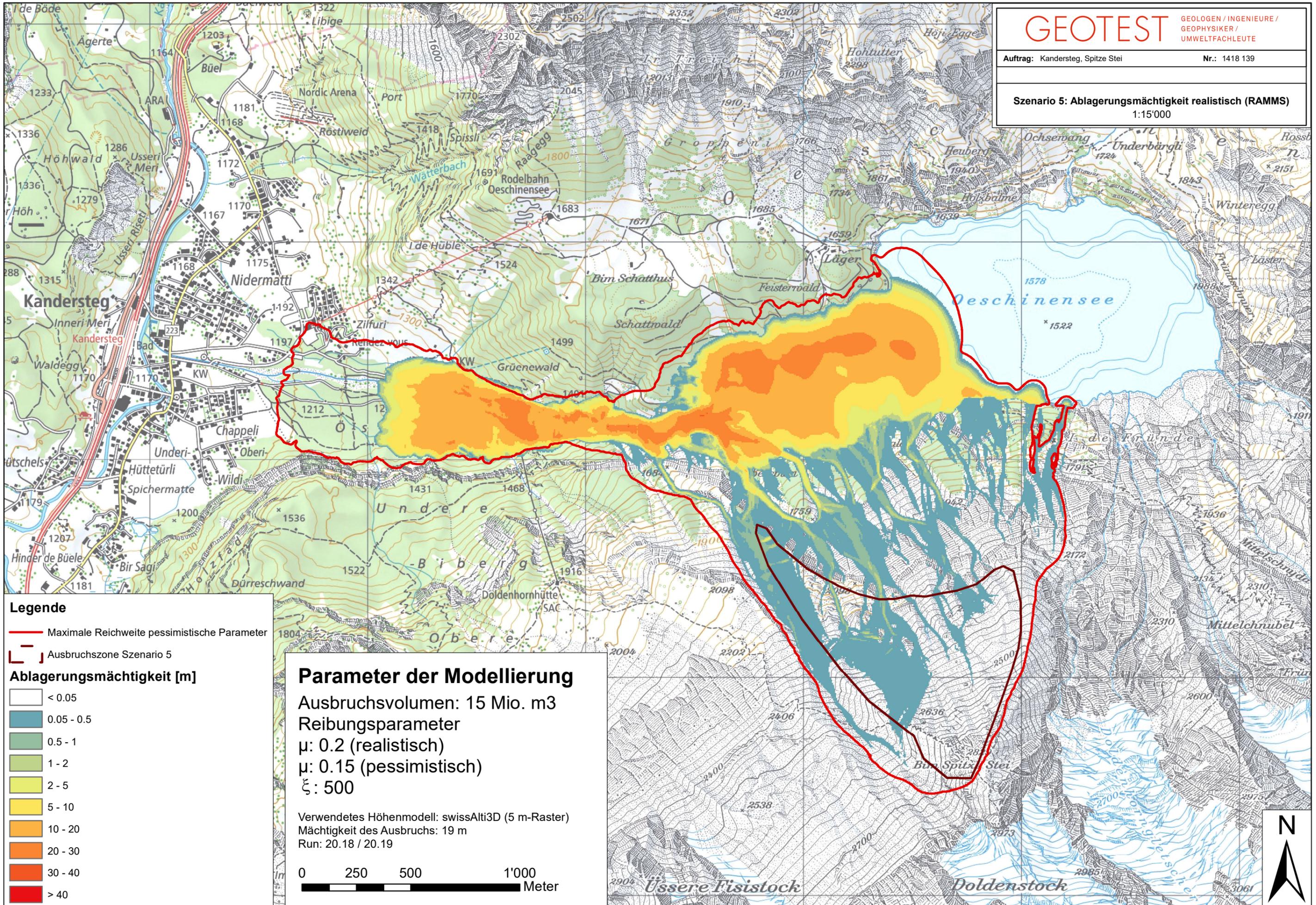
Verwendetes Höhenmodell: swissAlti3D (5 m-Raster)

Mächtigkeit des Ausbruchs: 11 m

Run Nr. 23.09 / 23.11





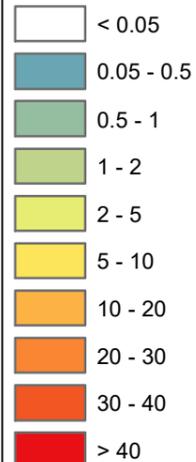


Legende

— Maximale Reichweite pessimistische Parameter

- - - Ausbruchszone Szenario 5

Ablagerungsmächtigkeit [m]



Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 15 Mio. m³

Reibungsparameter

μ : 0.2 (realistisch)

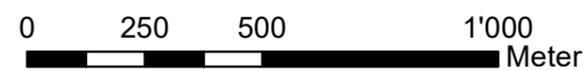
μ : 0.15 (pessimistisch)

ξ : 500

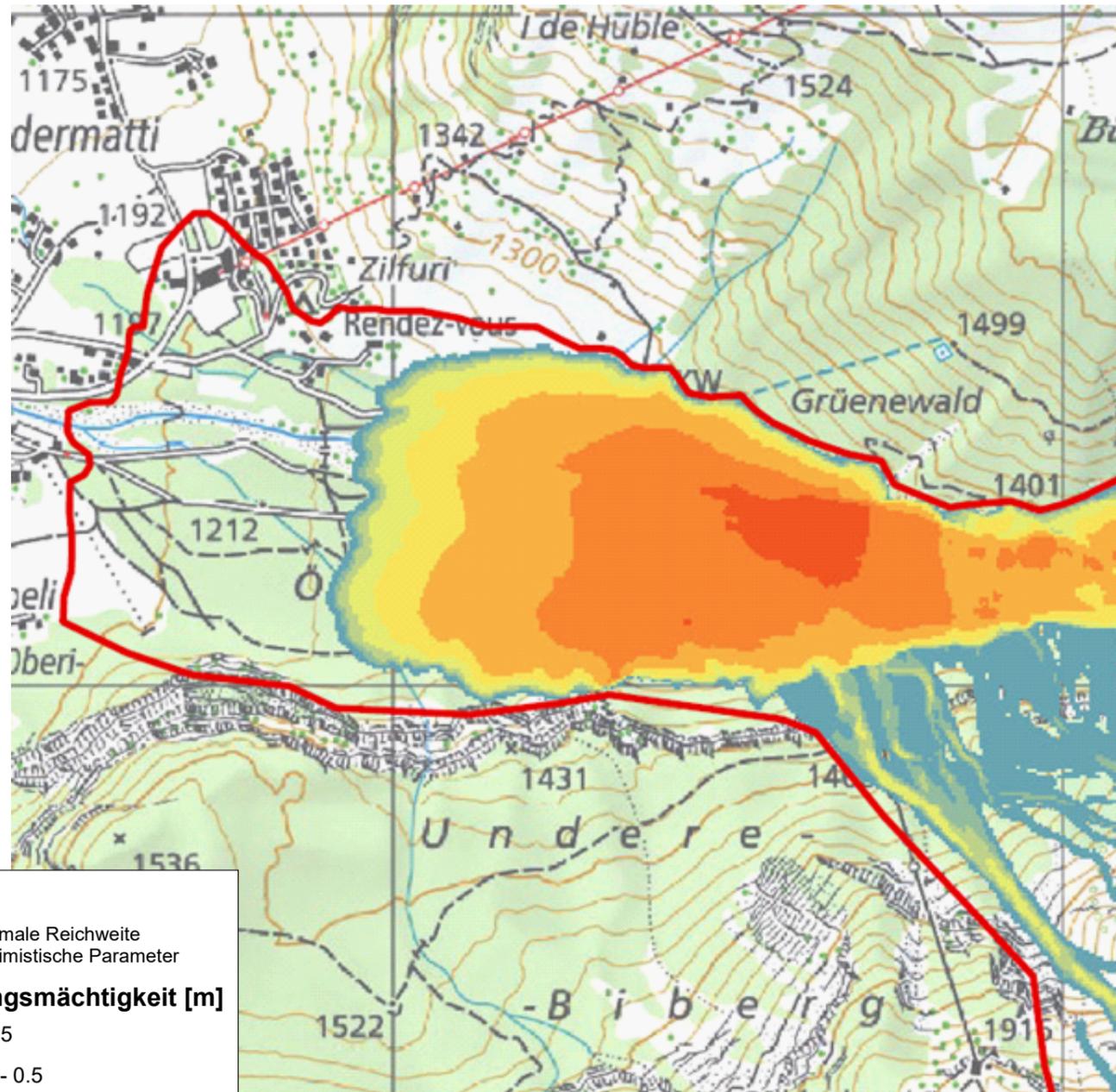
Verwendetes Höhenmodell: swissAlti3D (5 m-Raster)

Mächtigkeit des Ausbruchs: 19 m

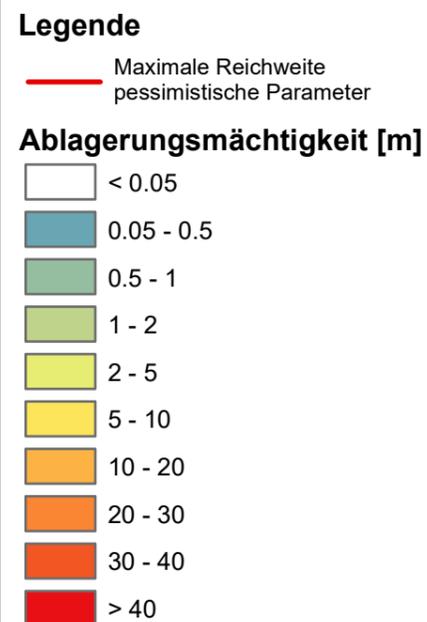
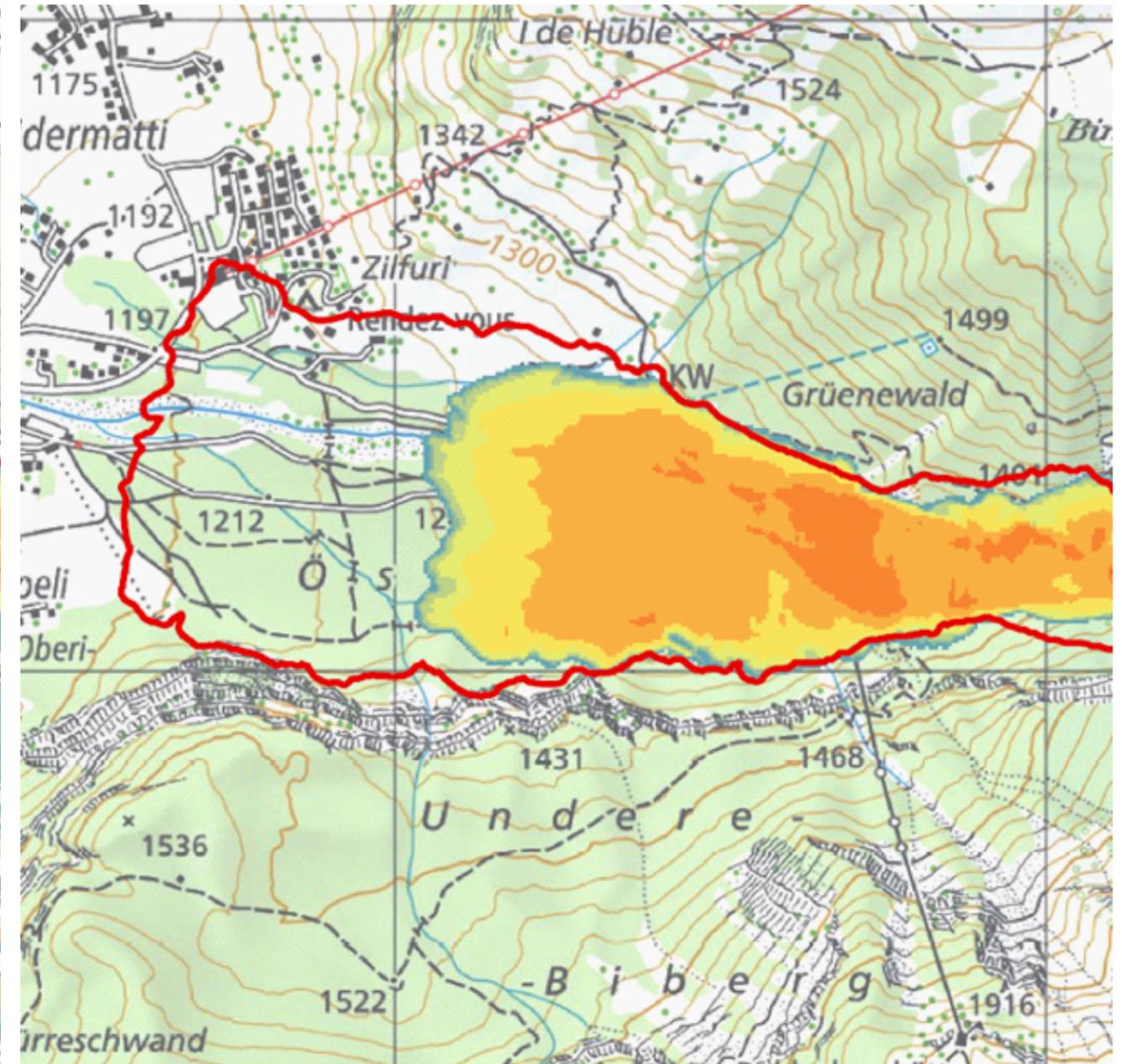
Run: 20.18 / 20.19



Ausbruch „West“



Ausbruch „Total“



Parameter der Modellierung

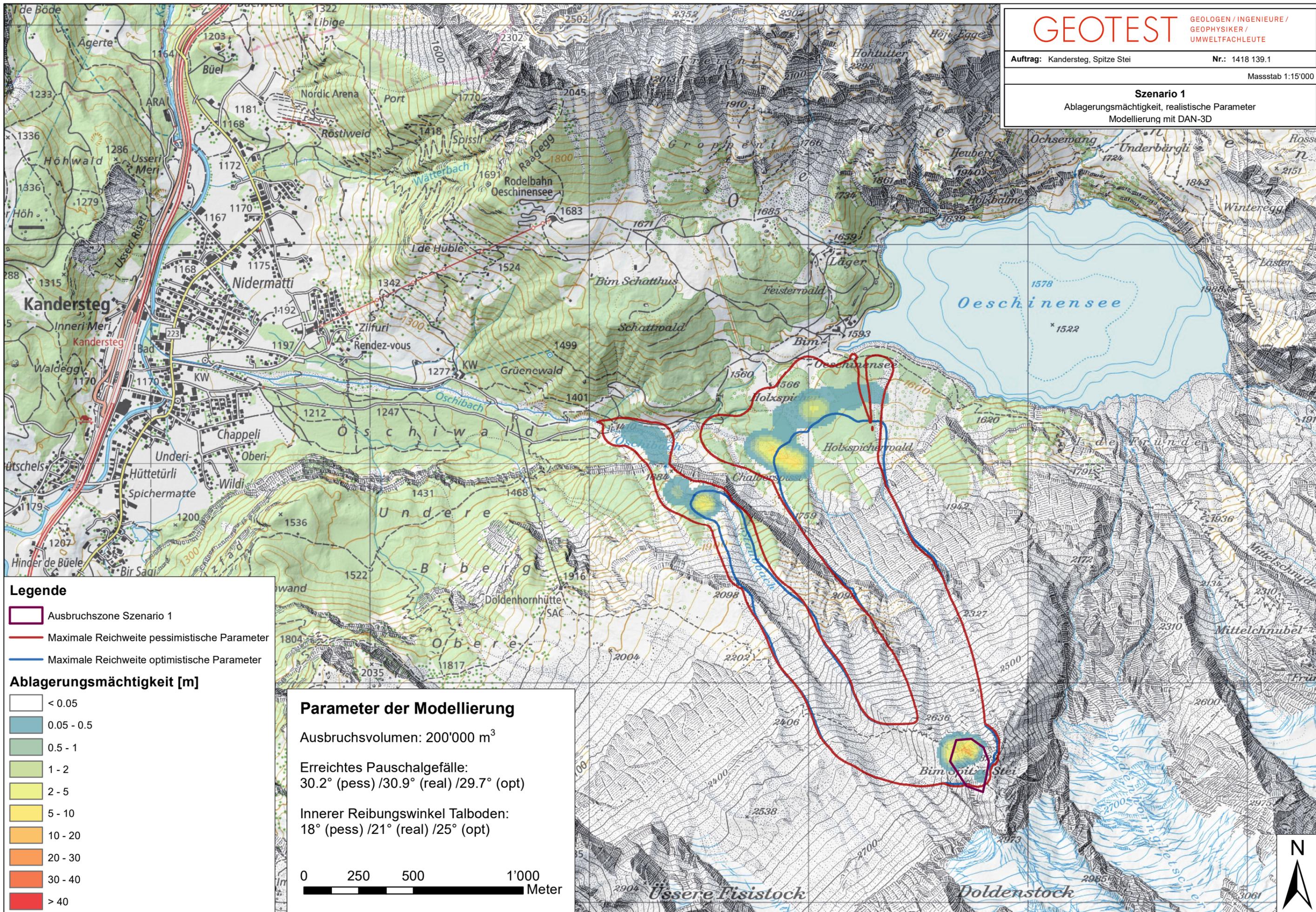
Reibungsparameter
 μ : 0.2 (realistisch)
 μ : 0.15 (pessimistisch)
 ξ : 500

Verwendetes Höhenmodell: swissAlti3D
 (5 m-Raster)



Szenario 1

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 1
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter
- Maximale Reichweite optimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 200'000 m³

Erreichtes Pauschalgefälle:
30.2° (pess) / 30.9° (real) / 29.7° (opt)

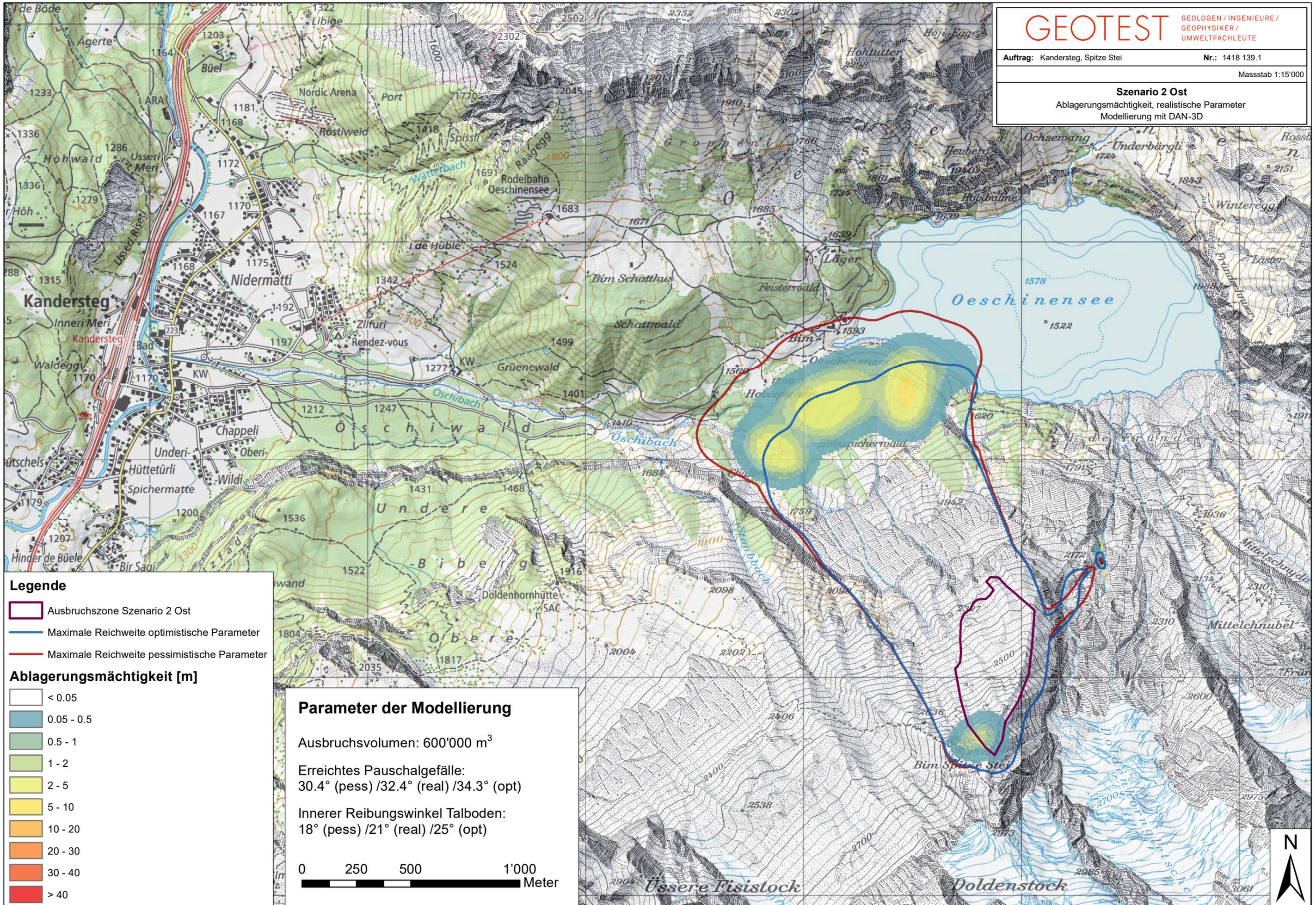
Innerer Reibungswinkel Talboden:
18° (pess) / 21° (real) / 25° (opt)

0 250 500 1'000
Meter



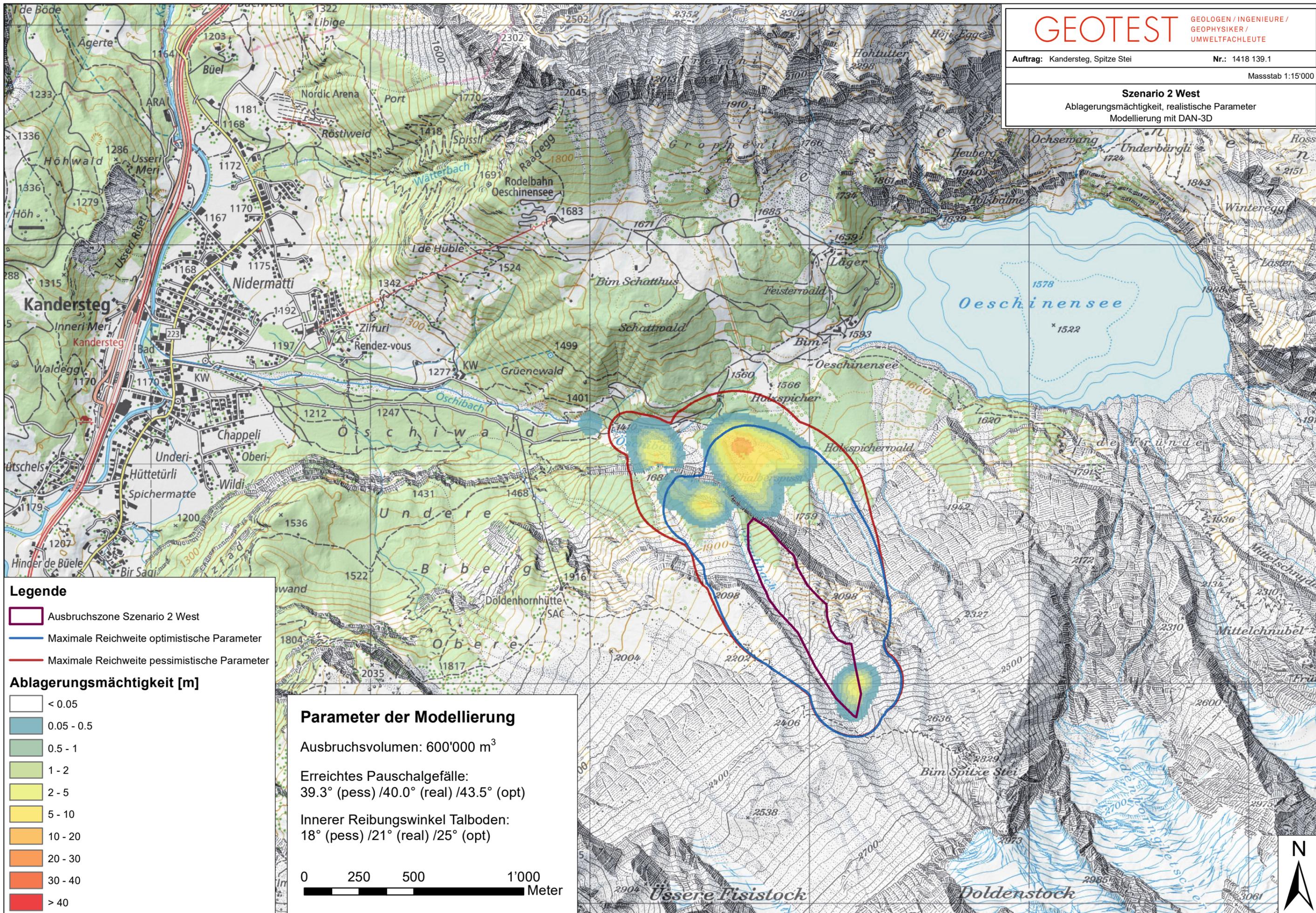
Szenario 2 Ost

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Szenario 2 West

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 2 West
- Maximale Reichweite optimistische Parameter
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

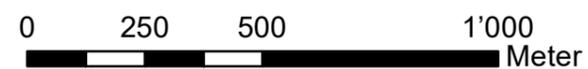
- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 600'000 m³

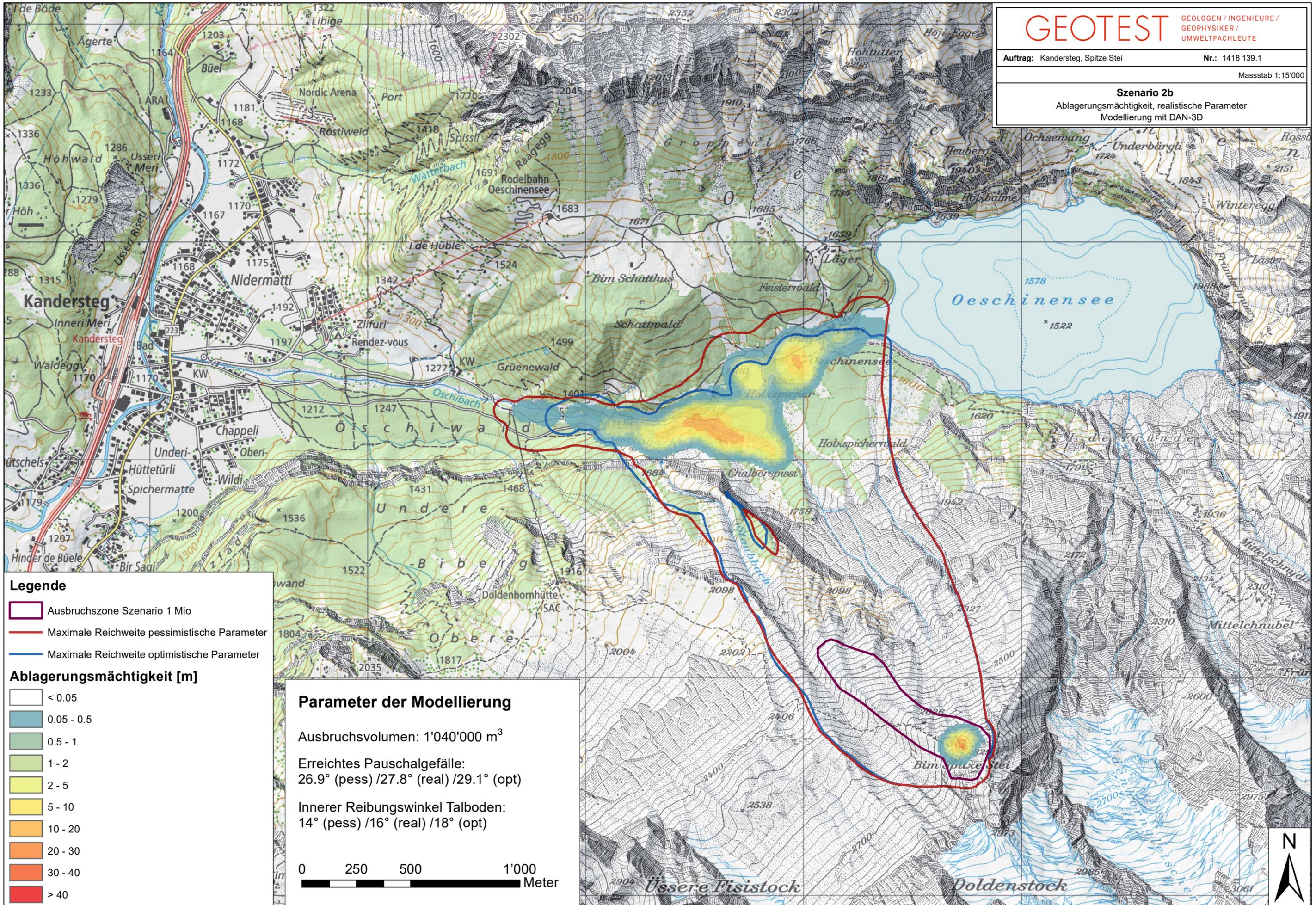
Erreichtes Pauschalgefälle:
39.3° (pess) / 40.0° (real) / 43.5° (opt)

Innerer Reibungswinkel Talboden:
18° (pess) / 21° (real) / 25° (opt)



Szenario 2b

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 1 Mio
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter
- Maximale Reichweite optimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 1'040'000 m³

Erreichtes Pauschalgefälle:
26.9° (pess) / 27.8° (real) / 29.1° (opt)

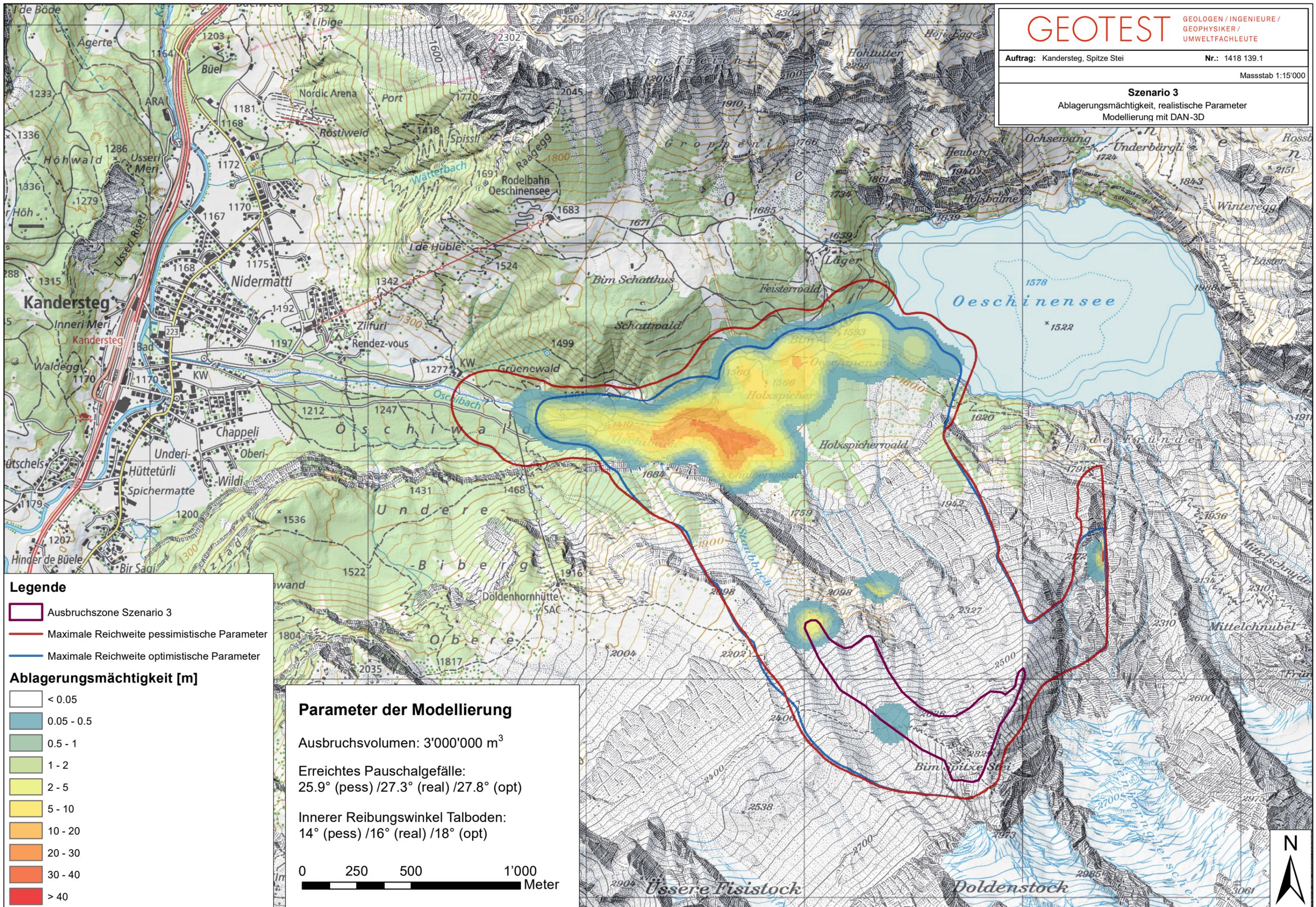
Innerer Reibungswinkel Talboden:
14° (pess) / 16° (real) / 18° (opt)

0 250 500 1'000
Meter



Szenario 3

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 3
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter
- Maximale Reichweite optimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 3'000'000 m³

Erreichtes Pauschalgefälle:
25.9° (pess) / 27.3° (real) / 27.8° (opt)

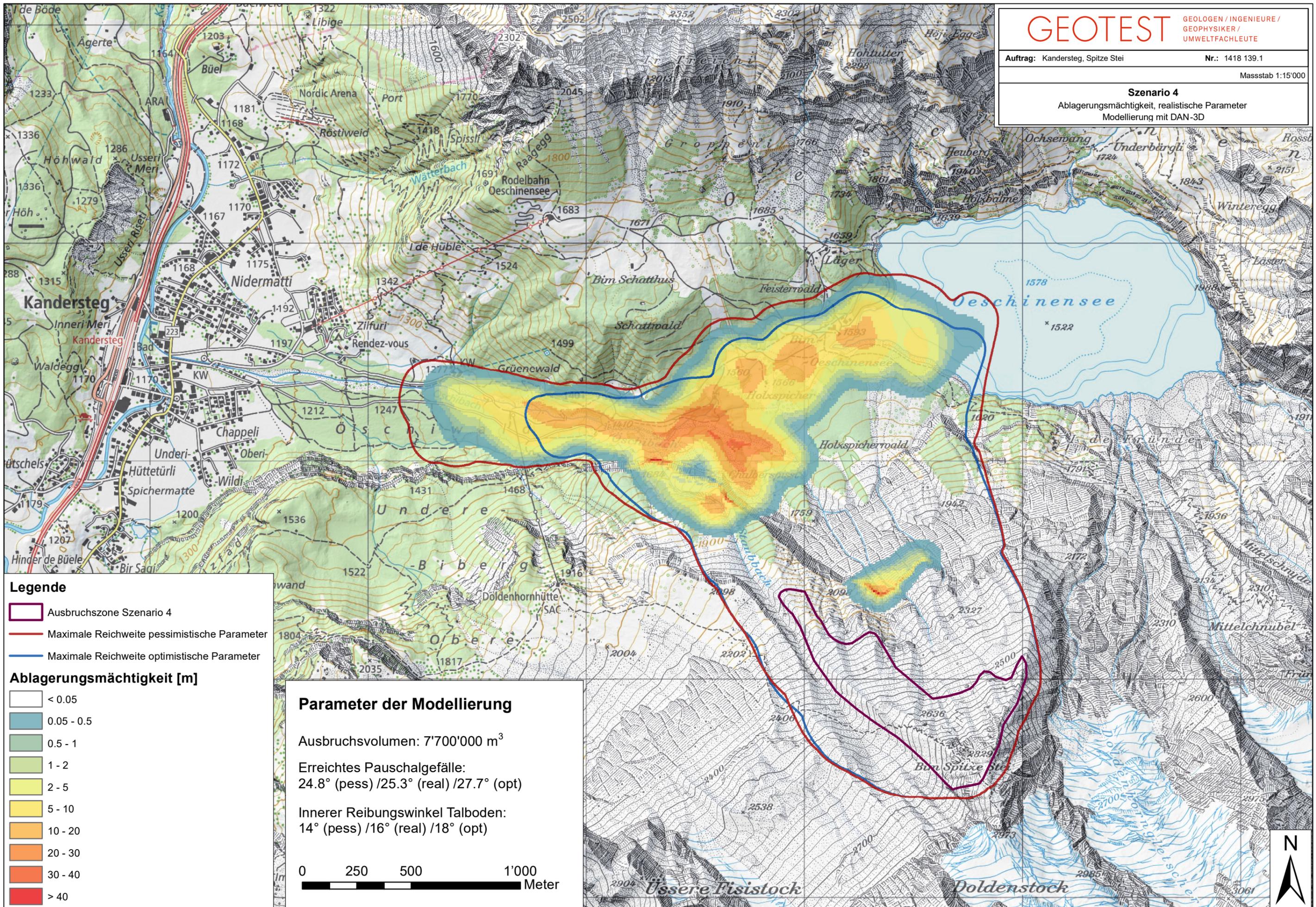
Innerer Reibungswinkel Talboden:
14° (pess) / 16° (real) / 18° (opt)

0 250 500 1'000
Meter



Szenario 4

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 4
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter
- Maximale Reichweite optimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

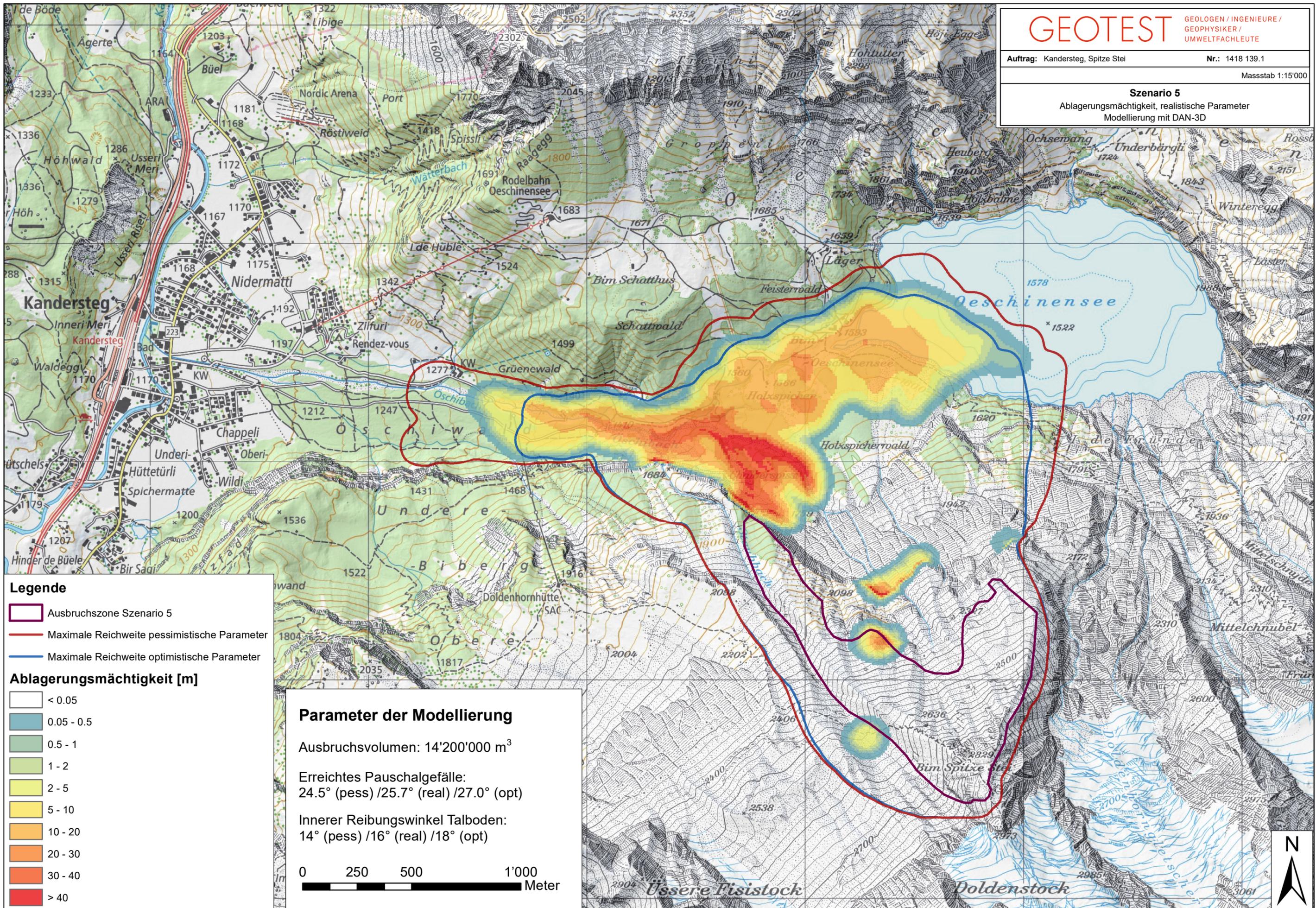
Ausbruchsvolumen: 7'700'000 m³
Erreichtes Pauschalgefälle:
24.8° (pess) / 25.3° (real) / 27.7° (opt)
Innerer Reibungswinkel Talboden:
14° (pess) / 16° (real) / 18° (opt)

0 250 500 1'000
Meter



Szenario 5

Ablagerungsmächtigkeit, realistische Parameter
Modellierung mit DAN-3D



Legende

- Ausbruchszone Szenario 5
- Maximale Reichweite pessimistische Parameter
- Maximale Reichweite optimistische Parameter

Ablagerungsmächtigkeit [m]

- < 0.05
- 0.05 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- > 40

Parameter der Modellierung

Ausbruchsvolumen: 14'200'000 m³

Erreichtes Pauschalgefälle:
24.5° (pess) / 25.7° (real) / 27.0° (opt)

Innerer Reibungswinkel Talboden:
14° (pess) / 16° (real) / 18° (opt)

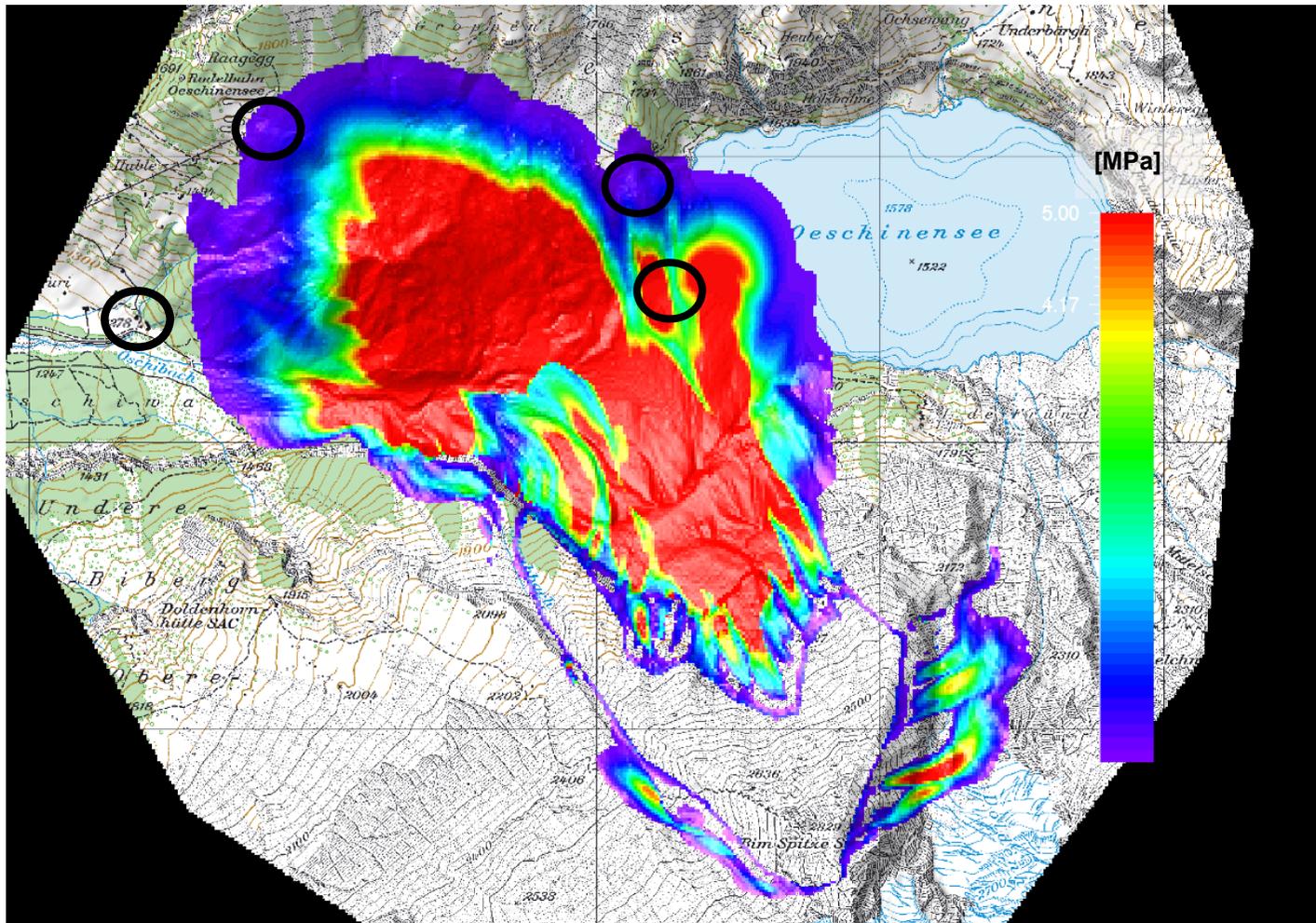
0 250 500 1'000
Meter



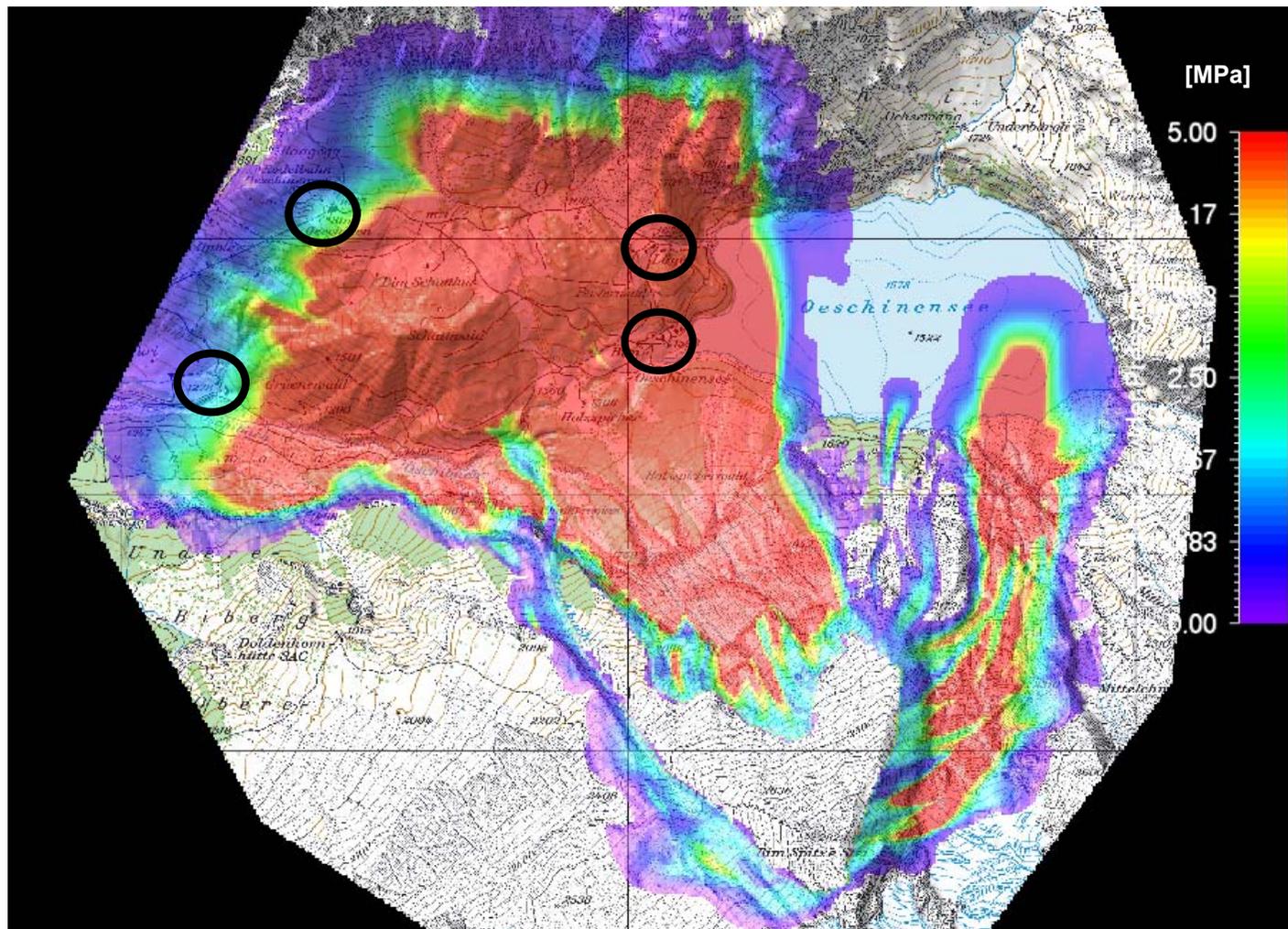
Anhang 3 Parametersetting und Resultate Impulsquelle

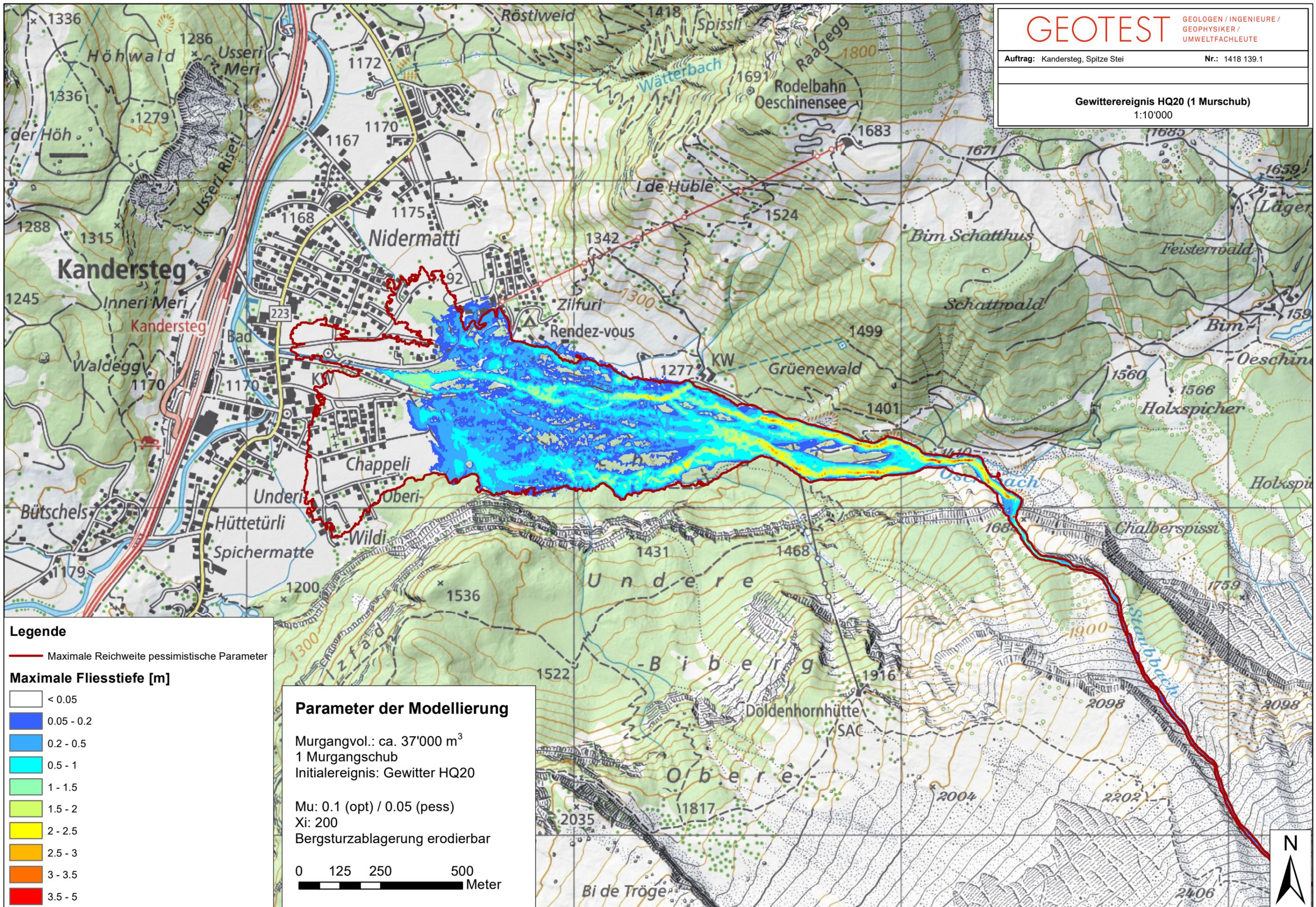
Szenario		Resultate		Fließparameter			Materialparameter		Geometrische Parameter							Modellgüte
Methode	Rutschvolumen in See [m3]	Wellenhöhe [m]	Auflaufhöhe [m]	v [m/s]	h [m]	b [m]	Dichte [kg/m3]	Porosität [%]	Eintauchwinkel [°]	Ruhewassertiefe [m]	Radialdistanz 3D [°]	Propagationswinkel 3D [°]	Wellendistanz 2D [m]	Ruhewassertiefe Auflauf [m]	Auflaufwinkel [°]	Verletzte Bedingungen
3D pess	13000	4.5	11.7	40	8	300	1800	35	12	55	800	20	-	15	8	8
3D opt	13000	1.8	3.7	30	5	450	1600	35	14	45	1100	30	-	25	10	6
2D pess	13000	5.7	18	40	8	450	1800	35	12	55	-	-	1200	15	8	7
2D opt	13000	3.1	7.7	30	5	850	1600	35	14	45	-	-	1400	25	10	6
3D pess	53000	5.9	16.2	40	8	300	1800	35	12	55	800	20	-	15	8	7
3D opt	53000	2.4	5.1	30	5	450	1600	35	14	45	1100	30	-	25	10	5
2D pess	53000	7.6	25	40	8	450	1800	35	12	55	-	-	1200	15	8	7
2D opt	53000	4	10.6	30	5	850	1600	35	14	45	-	-	1400	25	10	5

Anhang 4.1 Resultate Druckwellenmodellierung (Szenario 3, 8 Mio. m³)



Anhang 4.2 Resultate Druckwellenmodellierung (Szenario 5, 15 Mio. m3)

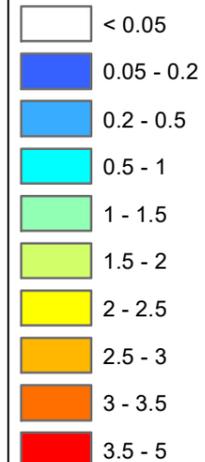




Legende

— Maximale Reichweite pessimistische Parameter

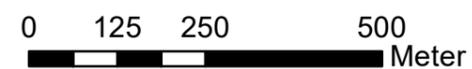
Maximale Fliesstiefe [m]

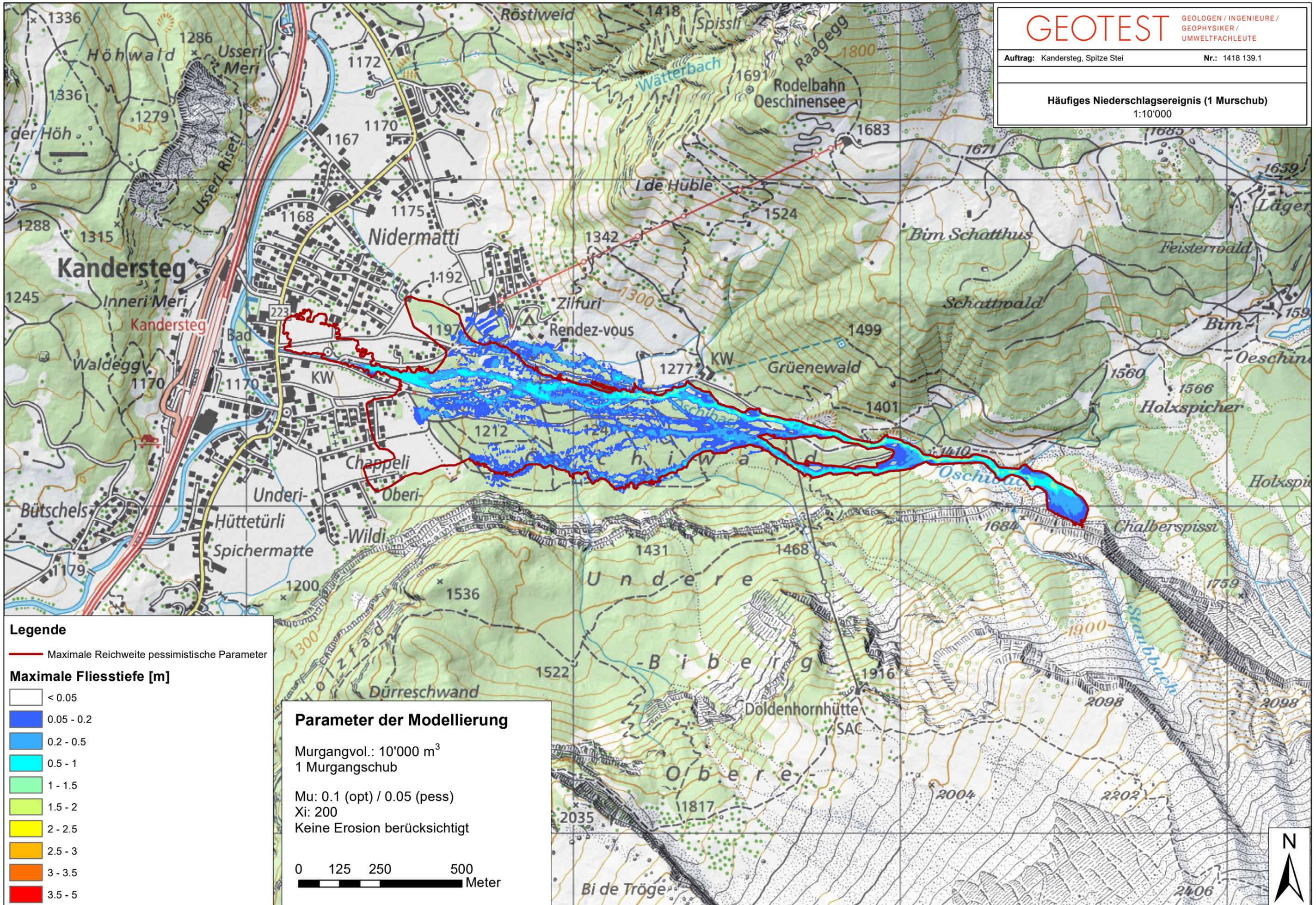


Parameter der Modellierung

Murgangvol.: ca. 37'000 m³
1 Murgangschub
Initialereignis: Gewitter HQ20

Mu: 0.1 (opt) / 0.05 (pess)
Xi: 200
Bergsturzlagerung erodierbar

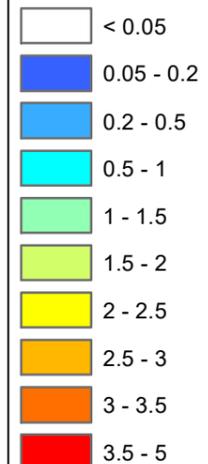




Legende

— Maximale Reichweite pessimistische Parameter

Maximale Fliesstiefe [m]



Parameter der Modellierung

Murgangvol.: 10'000 m³
1 Murgangschub

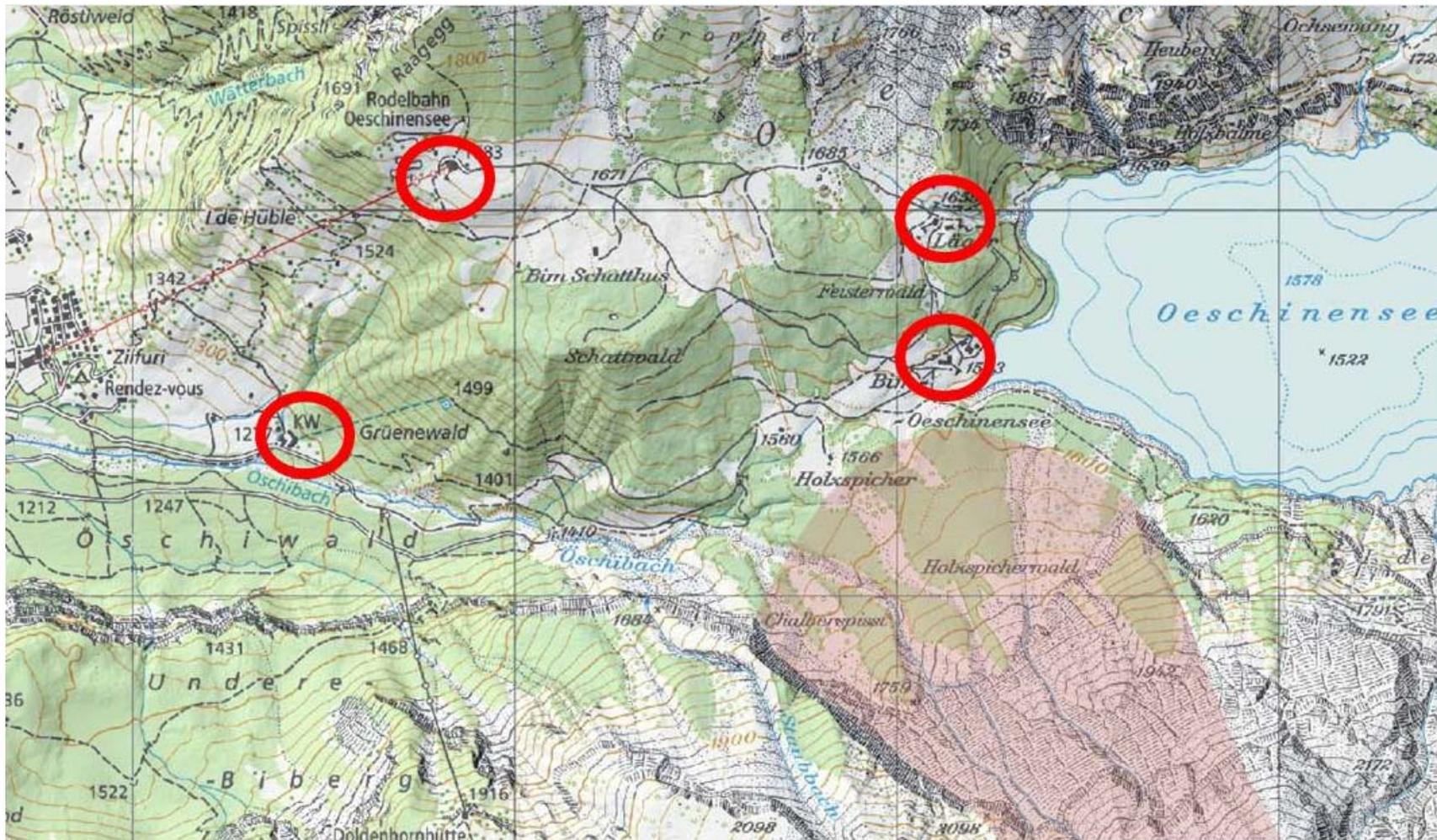
Mu: 0.1 (opt) / 0.05 (pess)

Xi: 200

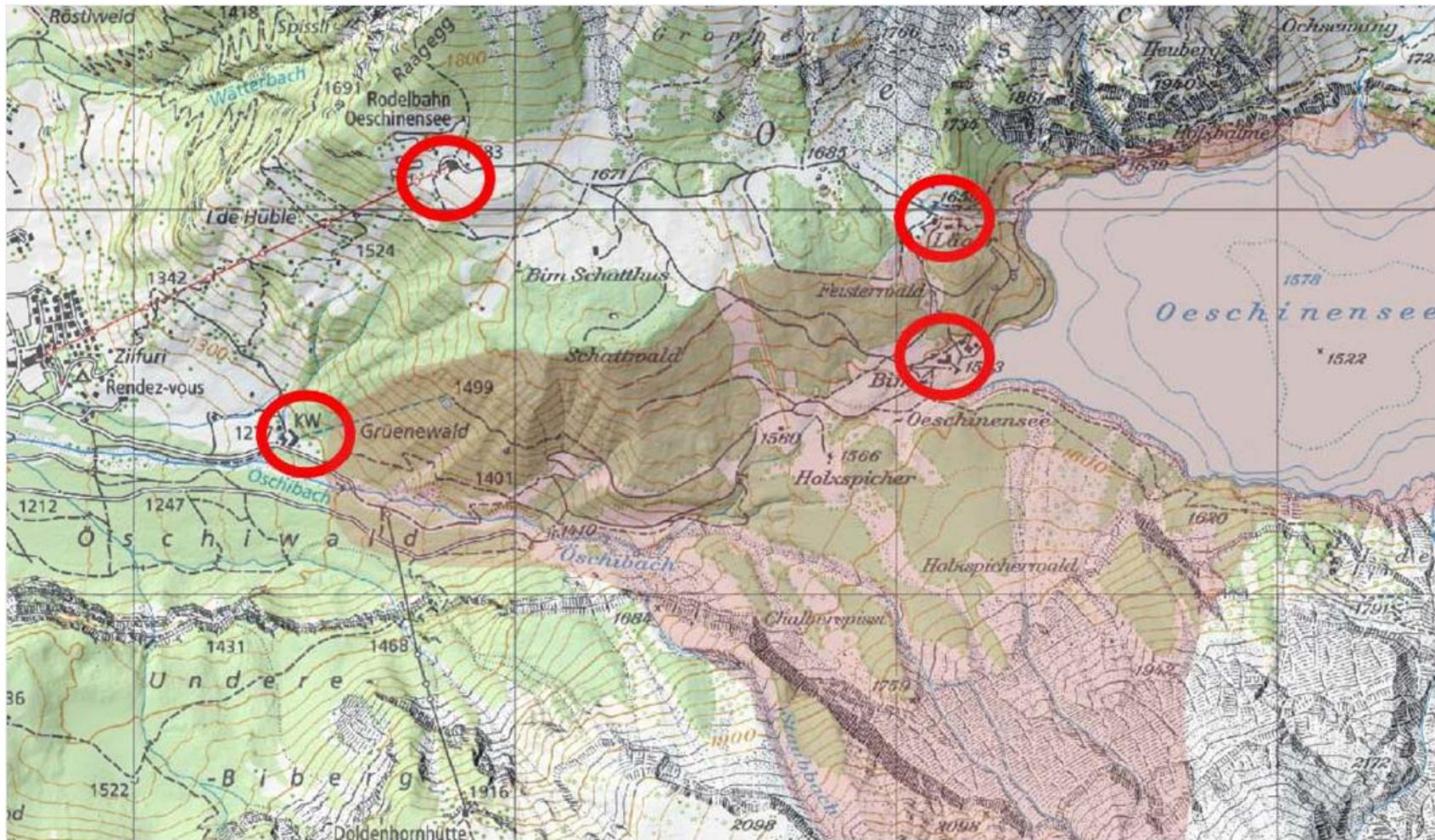
Keine Erosion berücksichtigt



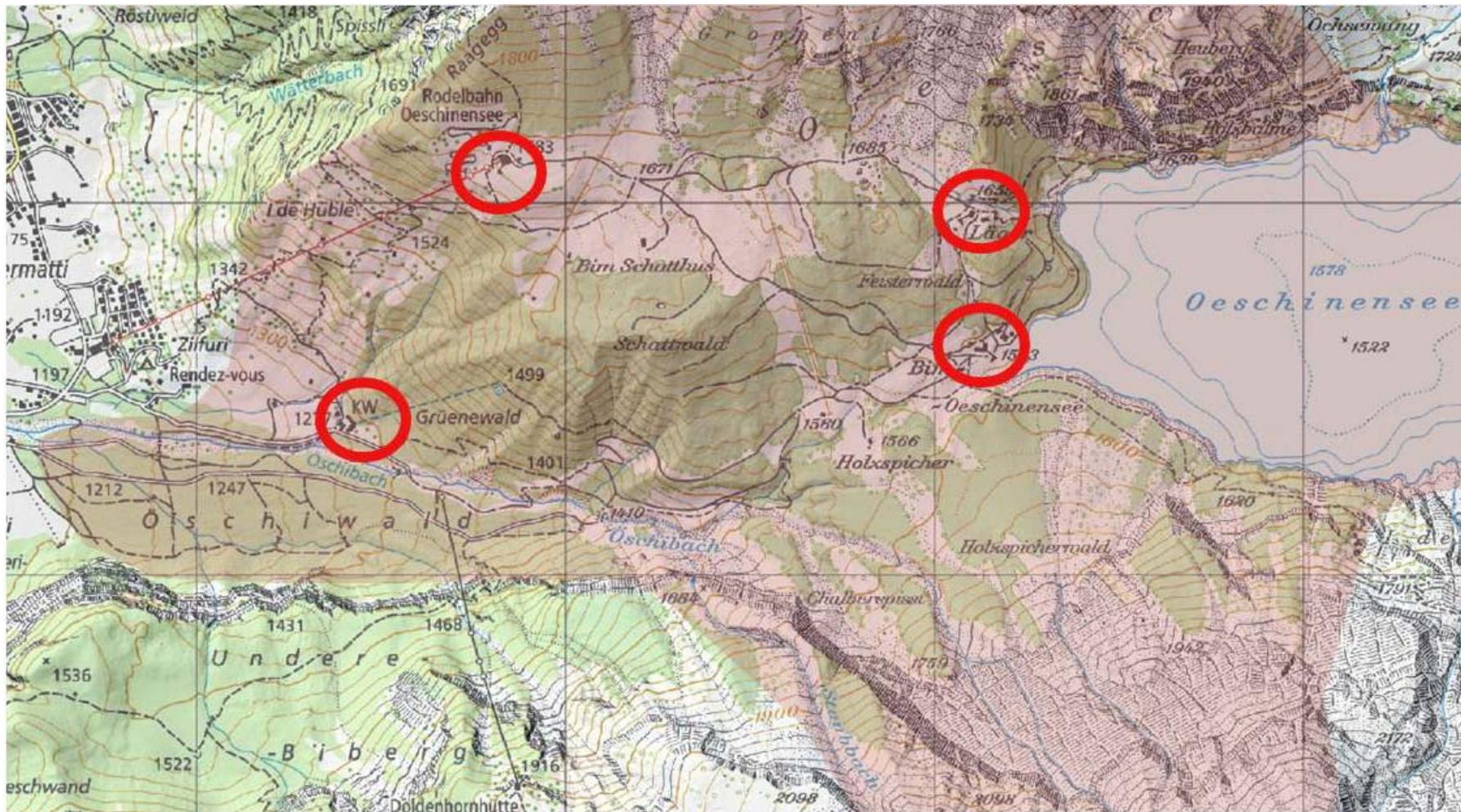
Anhang 6.1 Generelle Sicherheitszone (dauerhafte Absperrung)



Anhang 6.2 Sicherheitszonen ≤ 1 Mio. m³



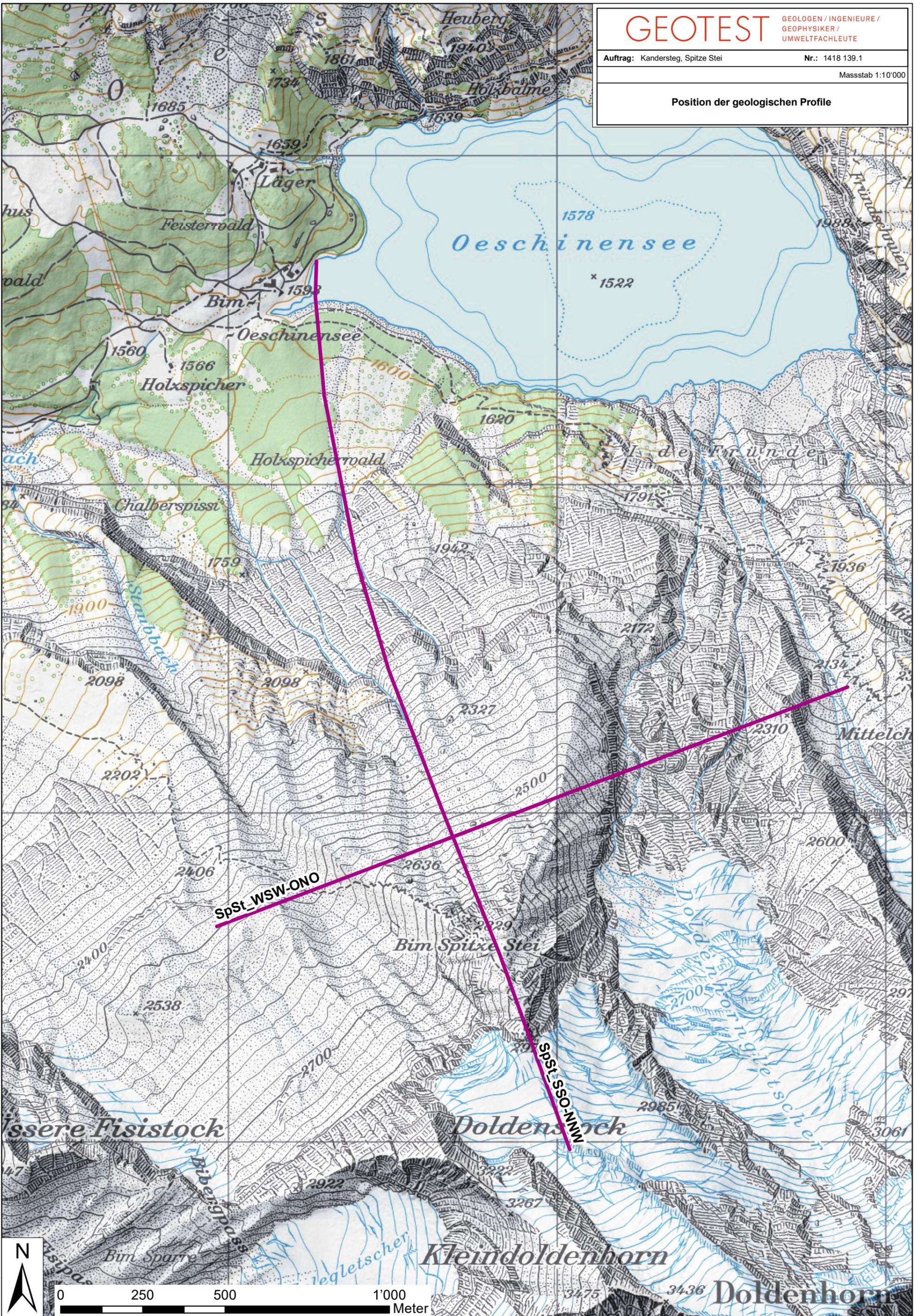
Anhang 6.3 Sicherheitszonen > 1 Mio. m3



Anhang 7 Gefahrenstufen gem. KAWA

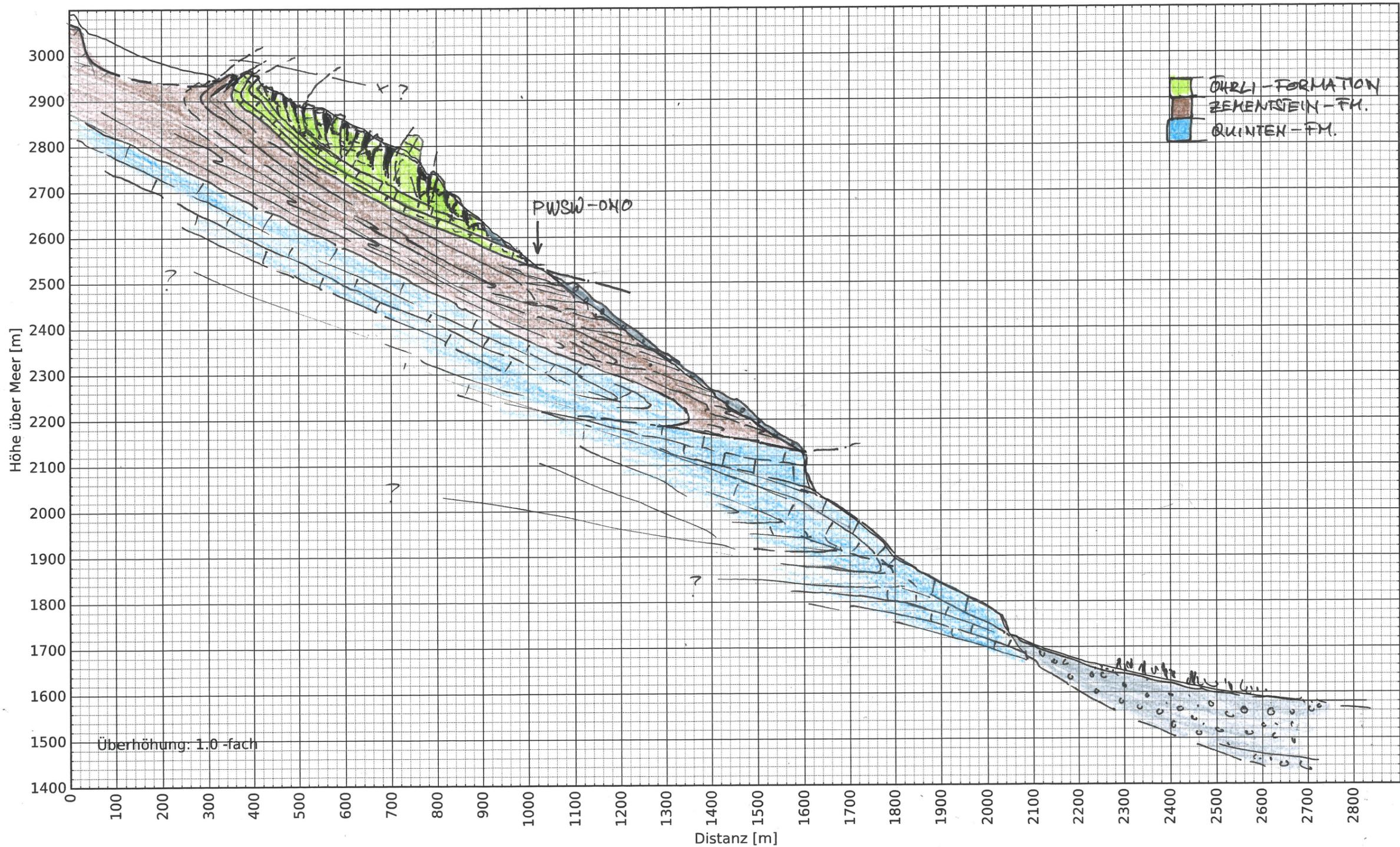
Gefahrenstufe		Bedeutung
1	Gering	Keine relevante Bewegung der gesamten Masse
2	Mässig	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamte Masse mit geringen Geschwindigkeiten (wenige mm/Woche) in Bewegung - Konstante Bewegung ohne Anzeichen für Beschleunigung <p>↳ Bewegungsraten weit weg von kritischen Werten für bevorstehenden, grösseren Abbruch</p>
3	Erheblich	<ul style="list-style-type: none"> - Teile der Masse mit beträchtlichen Geschwindigkeiten (etliche mm bis wenige cm/Woche) in Bewegung - Leicht variierende Bewegungsrate, aber ohne deutliche Anzeichen für Abbruch <p>↳ kleinere Abbrüche von weniger als 100'000 m³ im Einzelereignis möglich</p>
4	Gross	4A <ul style="list-style-type: none"> - Teile der Masse mit hohen Geschwindigkeiten in Bewegung (einige cm/Woche) - Klare Anzeichen einer Beschleunigung - Prognostizierter Abbruchzeitpunkt (time of failure) aufgrund aktueller Bewegungsrate frühestens in 5 - 10 Tagen <p>↳ Abbruch von mindestens einigen 100'000 m³ <u>in naher Zukunft möglich</u></p>
		4B <ul style="list-style-type: none"> - Teile der Masse mit hohen Geschwindigkeiten in Bewegung (einige cm/Woche) - Anhaltende und verstärkte Anzeichen einer Beschleunigung - Prognostizierter Abbruchzeitpunkt (time of failure) aufgrund aktueller Bewegungsrate in weniger als 5 - 10 Tagen <p>↳ Abbruch von mindestens einigen 100'000 m³ <u>innerhalb der nächsten Tage möglich</u></p>
5	Sehr gross	<ul style="list-style-type: none"> - Teile der Masse mit sehr hohen Geschwindigkeiten in Bewegung (einige cm/Tag) - Point of no return mit grosser Wahrscheinlichkeit überschritten <p>↳ Abbruch von einigen 100'000 m³ innerhalb weniger Tage <u>zu erwarten</u></p>

Position der geologischen Profile



Längenprofil Spitze Stei

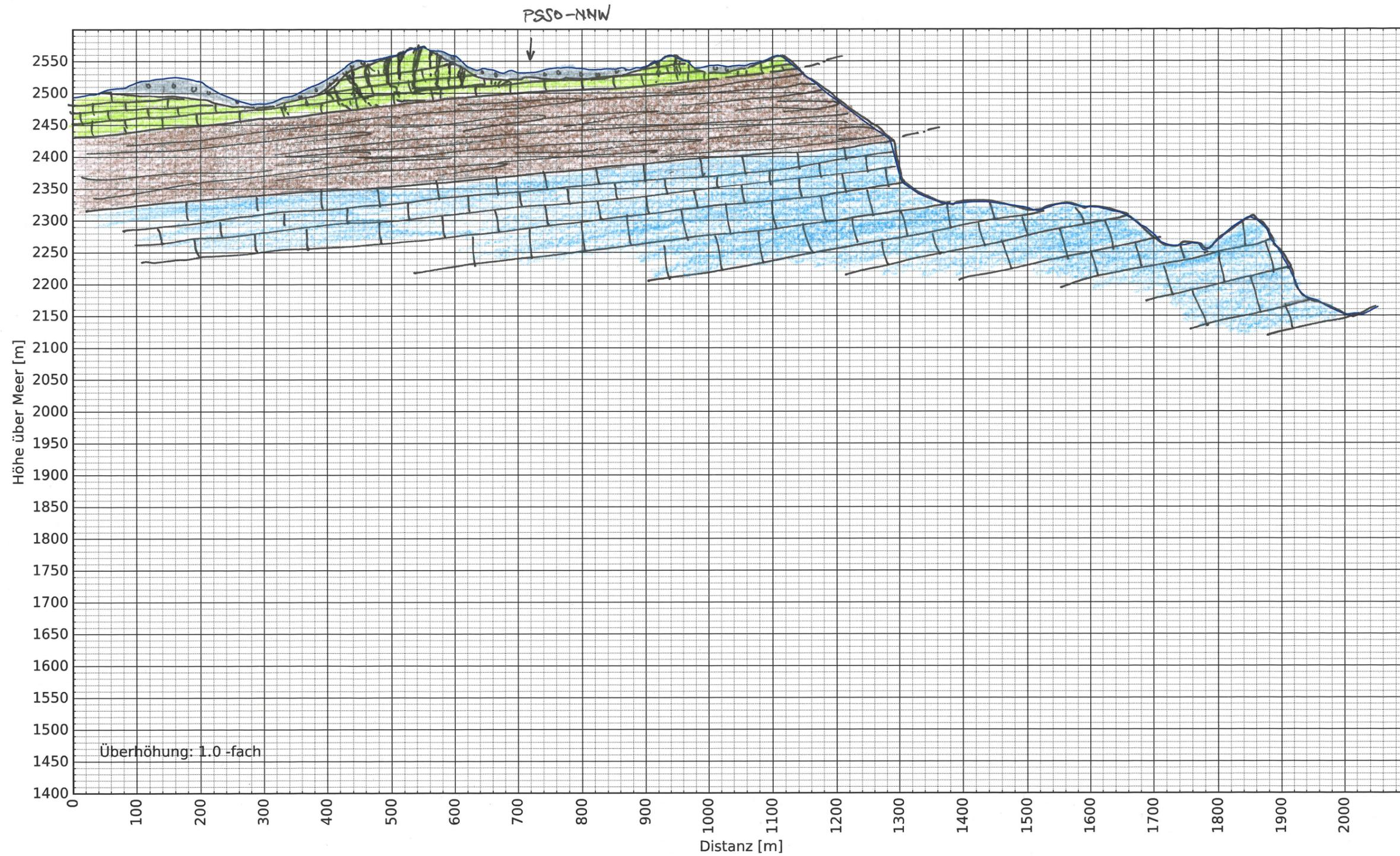
Profil SpSt_SSO-NNW



Querprofil Gipfelbereich Spitze Stei

Querprofil Gipfelbereich Spitze Stei

Profil SpSt_WSW-ONO



Anhang 9 Glossar

- Bergsturz:* Absturz sehr grosser Volumina ($> 1 \text{ Mio. m}^3$), im ursprünglichen Felsverband mehr oder weniger kohärenter Felsmassen unter Erreichung hoher Geschwindigkeiten, wobei der Transportmechanismus durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten („Sturzstrom“) gekennzeichnet ist.
- Felssturz:* Sturz einer Felsmasse ($100 \text{ bis } 1 \text{ Mio. m}^3$), die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird, wobei die Interaktionen zwischen den Komponenten keinen massgebenden Einfluss auf die Dynamik des Prozesses haben.
- Steinschlag,*
Blockschlag: Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen ($\varnothing < 50 \text{ cm}$) und Blöcken ($\varnothing > 50 \text{ cm}$).
- Murgang:* Schnell fliessendes Gemisch von Wasser und Feststoffen mit einem hohen Feststoffanteil von ca. 30% bis 60%; oft schubartig in Wildbächen oder Murfurchen erfolgend. Typisch sind grosse Dichte, z.T. hohe Fliessgeschwindigkeiten, hohe Transportkapazität (Blöcke von mehreren m^3 Volumen) und grosse umgesetzte Feststoffvolumina.
- Übersarung:* Ablagerung von Wildbachschutt und Murgangmaterial ausserhalb des Gerinnes (meist grobe Komponenten enthaltend).
- Überschwemmung,*
Überflutung: Vorübergehende Überdeckung einer Landfläche ausserhalb des Gerinnes mit Wasser (oft auch mit Feststoffen, die aus dem Gewässerbett ausgetreten sind). Im Gegensatz zur Übersarung ist das Geschiebe jedoch von deutlich untergeordneter Bedeutung.
- Geschiebe:* Feststoffe (z.B. Steine, Blöcke), die mit dem Wasser transportiert werden.