Publizierbarer Endbericht

gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	C3S-ISLS
Langtitel:	Klimabedingte Systemzustandsänderungen an Hängen und ihre Bedeutung für das Auftreten von Lockermaterialrutschungen Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility
Zitiervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	5th ACRP 2012
Dauer:	01.04.2013 bis 31.01.2017
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Martin Rutzinger, Clemens Geitner
Kontaktperson Name:	Martin Rutzinger, Thomas Zieher
Kontaktperson Adresse:	Institut für Geographie, Universität Innsbruck Innrain 52f A-6020 Innsbruck
Kontaktperson Telefon:	0512/507-54050
Kontaktperson E-Mail:	martin.rutzinger@uibk.ac.at, clemens.geitner@uibk.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Institut für Naturgefahren, Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) (Tirol) Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur Wien (Wien)
Schlagwörter:	Flachgründige Rutschungen, Hangstabilitätsmodell
Projektgesamtkosten:	299.980,00 €
Fördersumme:	299.980,00 €
Klimafonds-Nr:	KR12AC5K01084
Erstellt am:	12.04.2017

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

In Gebirgsregionen sind flachgründige Rutschungen weit verbreitete geomorphologische Phänomene, die eine potenzielle Gefahr für Siedlungen und Infrastruktur darstellen. Flachgründige Rutschungen werden als hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen von Lockermaterial (Boden, Schutt) mit einer Mächtigkeit von bis zu 2 m definiert. In der Regel liegt der Fokus auf Translationsrutschungen, die durch vordefinierte, hangparallele Gleitflächen charakterisiert sind (z.B. Cruden und Varnes 1996, Lateltin et al. 2005). Während der letzten Dekaden gab es in einigen Teilen Österreichs wiederholt Niederschlagsereignisse, die zahlreiche flachgründige Rutschungen auslösten. Besonders Vorarlberg war von derartigen Ereignissen stark betroffen (Andrecs et al. 2002, Markart et al. 2007).

Das Projekt C3S-ISLS zielt darauf ab, (i) das raum-zeitliche Auftreten flachgründiger Rutschungen in ausgewählten Untersuchungsgebieten in Vorarlberg zu dokumentieren (**WP2**), (ii) dynamische Hangstabilitätsmodelle zu testen und die Voraussetzungen für ihre Anwendung zu schaffen (**WP3**, **WP4**), (iii) die auslösenden Niederschlagsereignisse zu analysieren (**WP5**) und (iv) potenzielle Auswirkungen des Klimawandels auf die Hangstabilität zu beurteilen (**WP6**, Abb. 1).

Abb. 1: Übersicht über den Inhalt des Projekts C3S-ISLS.

Zunächst wurden für den Zeitraum von 1950 bis 2013 mehr als 2300 flachgründige Rutschungen innerhalb der gewählten Untersuchungsgebiete in einem umfangreichen Rutschungsinventar dokumentiert (**WP2**). Für die flächendeckende Beurteilung der Anfälligkeit der Untersuchungsgebiete gegenüber flachgründigen Rutschungen können verschiedene Modellansätze (experten-basierte, statistische und physikalisch-basierte Modelle) eingesetzt werden. Physikalisch-basierten Modellen liegen physikalische Gesetzmäßigkeiten, die die Hangstabilität beschreiben zugrunde. Die notwendigen Eingangsparameter für das eingesetzte räumlich verteilte, dynamische Hangstabilitätsmodell (TRIGRS 2.0, Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0; Baum et al. 2008, 2010, USGS 2016) wurden aus Laborexperimenten abgeleitet. Dazu wurden geotechnische Proben im Laternsertal geworben (**WP3**). Zudem wurde die Anwendbarkeit dieses Modells in einem Feldexperiment getestet (**WP3**, **WP4**). Anhand der dokumentierten flachgründigen Rutschungen, die zwei auslösenden Niederschlagsereignissen zugeordnet werden konnten (21./22. Mai 1999, 22./23. August 2005) wurden die einflussreichsten Eingangsparameter systematisch kalibriert und validiert (**WP4**). Für insgesamt fünf rutschungs-auslösende Niederschlagsereignisse wurden stündliche Niederschlagskarten aufbereitet und

analysiert (Mai 1999, August 2002, August 2005, Juli 2010 und Juni 2013; **WP5**). Das kalibrierte Modell-Ensemble wurde schließlich mit den aufbereiteten Niederschlagskarten für aktuelle rutschungs-auslösende Niederschlagsereignisse angetrieben. Zudem wurde die Niederschlagsintensität schrittweise erhöht, um potenzielle Auswirkungen auf die Hangstabilität durch mögliche Veränderungen bedingt durch den Klimawandel abschätzen zu können. Die Ergebnisse gingen anschließend in ein empirisches Auslaufmodell ein, um potenziell gefährdete Gebiete – sowohl der Rutschungsanfälligkeit, als auch des Auslaufes – zu identifizieren (**WP6**).

Die Ergebnisse der Simulationen legen eine leichte Zunahme an potenziell instabilen Flächen durch einen Anstieg der Niederschlagsintensität nahe. Gleichzeitig nimmt den Modellergebnissen zufolge der Oberflächenabfluss markant zu. Dies lässt darauf schließen, dass die Niederschlagsintensität während der untersuchten Ereignisse bereits nahe an oder über der Infiltrationskapazität des Bodens lag. Ein weiterer Anstieg der Niederschlagsintensität während derartiger Niederschlagsereignisse hätte demnach in erster Linie einen Anstieg des Oberflächenabflusses zur Folge. Ein genereller Anstieg der Niederschlagsintensität könnte jedoch dazu führen, dass vermehrt Niederschlagsereignisse eintreten, die potenziell Rutschungen auslösen können. Die Daten und Ergebnisse des Projekts C3S-ISLS stellen eine solide Grundlage für weiterführende Studien dieses Zusammenhangs dar.

2 Executive Summary

Shallow landslides are a common geomorphological feature in the Alpine region often putting lives and infrastructure at risk. The term 'shallow landslides' typically refers to translational sliding movements of soil material (earth and debris), characterized by a pre-defined slip surface in a depth of up to 2.0 m (e.g. Cruden and Varnes 1996, Lateltin et al. 2005). In the past decades, parts of Vorarlberg, the westernmost province of Austria, were repeatedly affected by rainfall-triggered shallow landslides (Andrecs et al. 2002, Markart et al. 2007). The project C3S-ISLS strives at (i) documenting the spatio-temporal occurrence of shallow landslides in parts of Vorarlberg (**WP2**), (ii) testing and parameterizing of a spatially distributed, dynamic physically-based slope stability model (**WP3**, **WP4**), (iii) the analysis of landslide-triggering rainfall events (**WP5**) and (iv) the assessment of potential changes in slope stability as a response to climate change (**WP6**, Abb. 2).

Abb. 2: Brief structure of the project C3S-ISLS.

For the period from the 1950s to 2013, more than 2,300 shallow landslides have been documented in a comprehensive shallow landslide inventory for three selected study areas in Vorarlberg (**WP2**). To be aware of the associated risks it is necessary to assess shallow landslide susceptibility, hazard and risk area-wide. Various techniques have been proposed for landslide susceptibility modelling/mapping (i.e. heuristic, statistically- and physically-based). Amongst them, physically-based landslide susceptibility models employ physical laws to assess slope stability. The required input parameter for a selected spatially distributed, dynamic physically-based slope stability model (TRIGRS 2.0, Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0; Baum et al. 2008, 2010, USGS 2016) were derived from laboratory tests conducted on collected geotechnical samples (**WP3**). Furthermore, the model's predictive performance was tested in a field experiment (**WP3**, **WP4**). Based on the mapped landslides assigned to two triggering rainfall events (21/22 May 1999, 22/23 August 2005), the model's key parameters were calibrated and validated (**WP4**). Spatio-temporal precipitation data was prepared and analysed for five landslide-triggering rainfall events (May 1999, August 2002, August 2005, July 2010 and June 2013; **WP5**). With the prepared precipitation maps, the identified best-performing model ensemble was used to assess shallow landslide susceptibility for current conditions and to quantify potential changes in slope stability associated with increasing rainfall intensities. Combined with an empirical runout model, areas which could be affected by shallow landslides were identified (**WP6**).

Simulation results suggest a slight increase of areas affected by shallow landslides as a result of increased precipitation intensity. At the same time, the peak runoff increases markedly. This could indicate that the precipitation intensities of past landslide-triggering rainfall events were already above

or close to the soil's infiltration capacity. However, a general increase in precipitation intensity could lead to an increase in the frequency of landslide-triggering rainfall events. Rainfall events which did not trigger any shallow landslides in the past may become trigger events under a changing climate in future. Further studies focussing on this aspect are necessary. The data and results of the C3S-ISLS project will provide a solid basis for this purpose.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Ausgangslage

Flachgründige Rutschungen sind geomorphologische Phänomene in Gebirgsregionen, die potenziell Schäden an Siedlungsobjekten und Infrastruktur anrichten, aber auch den Verlust von Agrarflächen mit sich bringen können. Obwohl flachgründige Rutschungen meist geringe Volumina an Material mobilisieren, sind die verursachten Schäden aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit und der Unvorhersagbarkeit ihrer räumlichen Ausbreitung meist dennoch enorm. In Österreich werden flachgründige Rutschungen aktuell vermehrt im Naturgefahrenmanagement berücksichtigt. Im Alpenraum werden flachgründige Rutschungen meist durch intensive und langanhaltende Niederschläge ausgelöst. Bedingt durch den Klimawandel werden Veränderungen der Niederschlagsmenge als auch ihrer räumlichen Verteilung erwartet. Folglich könnte auch das Auftreten flachgründiger Rutschungen von diesen Veränderungen betroffen sein. Vor allem Hänge, die sich unter den aktuellen Bedingungen bereits in einem kritischen Systemzustand befinden, könnten unter zukünftigen Klimabedingungen instabil werden. Um künftigen schadbringenden Ereignissen vorzubeugen, müssen diese gegenüber flachgründigen Rutschungen anfälligen Hänge identifiziert werden. Ein kritischer Systemzustand ist dabei das Produkt aus einer gegebenen Grunddisposition (z.B. Hangneigung, Charakteristika des Lockermaterials) und der variablen Disposition (z.B. Hanghydrologie). Im Zuge eines auslösenden Ereignisses (z.B. intensive, langanhaltende Niederschläge) kann ein rutschungsanfälliger Hang abgleiten. Für die Identifikation potenziell anfälliger Hänge unter den aktuellen klimatischen Bedingungen müssen sowohl die Grunddisposition als auch die variable Disposition flächendeckend erfasst werden. Daraus können anschließend durch den Klimawandel bedingte Veränderungen der Hangstabilität abgeschätzt und beurteilt werden.

Untersuchungsgebiete

Die drei Untersuchungsgebiete befinden sich in Vorarlberg (Abb. 3). Während der letzten Jahrzehnte gab es wiederholt Niederschlagsereignisse, die zahlreiche flachgründige Rutschungen auslösten (Andrecs et al. 2002, Markart et al. 2007, Zieher et al. 2016a). Das Laternsertal ist ein etwa 13 km langes, in Ost-West-Richtung verlaufendes Tal Zentralvorarlbergs. Sein Talausgang liegt nahe Feldkirch auf etwa 500 m. Die Gemeinden Au und Schnepfau liegen im Bregenzerwald, nordöstlich des Laternsertals. Administrative Grenzen wurden in diesem Fall gegenüber einer hydrologischen Abgrenzung bevorzugt. Das Kleinwalsertal liegt im äußeren Nordwesten Vorarlbergs. Der Talausgang an der Grenze zu Deutschland liegt auf etwa 900 m. Weitere Details zu den Untersuchungsgebieten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Charakteristika der Untersuchungsgebiete des Projekts C3S-ISLS.

	Laternsertal	Au/Schnepfau	Kleinwalsertal
Fläche [km²]	52.1	61.5	113.7
Min. Seehöhe	493	696	905
Max. Seehöhe	2004	2297	2533
Mittlere Hangneigung [deg]	26.6	28.1	26.4
SF [km²/%]	35.3/68	41.5/67	71.7/63
MJT (1961–1990) [°C]	5.4	7.1	5.4
Mittlerer Niederschlag (1961–1990) [mm]			
Dez, Jan, Feb	371	416	424
Mär, Apr, Mai	410	442	416
Jun, Jul, Aug	609	694	613
Sep, Okt, Nov	357	399	382
JAHR	1749	1951	1835

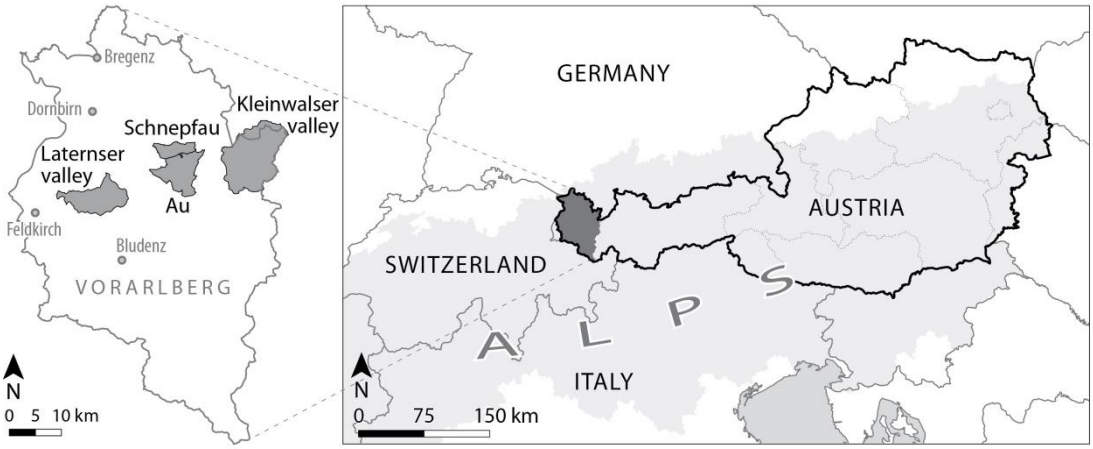

Abb. 3: Lage der Untersuchungsgebiete des Projekts C3S-ISLS.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

In dem Projekt C3S-ISLS wurden flachgründige Rutschungen untersucht. Für diese Phänomene gibt es keine allgemeingültige Definition. Sie werden meist als hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen von Lockermaterial (Boden, Schutt) mit einer Mächtigkeit von 1 bis 2 m definiert (Cruden und Varnes 1996, Lateltin et al. 2005). Dabei liegt der Fokus auf Translationsrutschungen, die durch vordefinierte, hangparallele Gleitflächen charakterisiert sind. Als Gleitflächen können etwa das unterliegende Festgestein, aber auch überkonsolidierte Sedimente (z.B. Grundmoräne) oder wasserstauende Schichten innerhalb der Lockermaterialauflage fungieren. Bei ausreichendem Wassergehalt kann die initiale Gleitbewegung in eine Fließbewegung (Hangmure) mit Auslaufdistanzen von mehreren hunderten Metern übergehen.

Das Projekt C3S-ISLS zielte auf die Dokumentation und Vorhersage flachgründiger Rutschungen in ausgewählten Untersuchungsgebieten in Vorarlberg ab. Zudem wurden auslösende Niederschlagsereignisse eingehend untersucht. Die Aufgabenstellung und Ziele des Projekts C3S-ISLS beinhalteten:

1) Erstellung einer Rutschungsdatenbank (Rutschungsinventar)
2) Erfassen der notwendigen Eingangsparameter für ein physikalisch-basiertes, dynamisches Hangstabilitätsmodell
3) Nachweis der Eignung des gewählten Modells (TRIGRS 2.0; Baum et al. 2008, 2010, USGS 2016) in Feldexperimenten
4) Kalibrierung und Validierung einer erweiterten Modellversion
5) Aufbereitung und Analyse von Niederschlagsdaten rutschungsauslösender Ereignisse
6) Abschätzung von potenziellen Veränderungen der Hangstabilität durch zunehmende Niederschlagsintensitäten
7) Beurteilung von Auswirkungen (Gefahrenkarte) unter gegenwärtigen und zukünftigen Niederschlagsverhältnissen

4 Projektinhalt und Ergebnisse

Mehrjähriges Rutschungsinventar

Das Rutschungsinventar wurde auf drei Bearbeitungsstufen erstellt. Auf Stufe A wurde alle verfügbaren Berichte und Dokumentationen über flachgründige Rutschungen aus bestehenden Archiven gesammelt und wenn möglich verortet. Auf Stufe B wurden geomorphologische Hinweise auf flachgründige Rutschungen systematisch auf Basis von neuen Orthophotoserien (195x, 197x, 198x, 199x, 2001, 2005, 2006, 2009, 2012) und Ableitungen von zwei digitalen Geländemodellen (DGMs) kartiert. Diese Interpretation von Fernerkundungsdaten wurde für das Laternsertal (Gemeinden Laterns, Rankweil, Zwischenwasser, Düns, Dünserberg, Röthis, Übersaxen, Sulz und St. Gerold), das Kleinwalsertal (Gemeinde Mittelberg) und den Gemeinden Au und Schnepfau durchgeführt. Auf Stufe C wurden im Laternsertal Anbruchflächen flachgründiger Rutschungen mit Hilfe eines differenziellen digitalen Geländemodells (dDGM; DGM 2004 subtrahiert von DGM 2011) kartiert. Weitere Details zu dem erstellten Rutschungsinventar für das Laternsertal und das Kleinwalsertal auf Stufe B und C werden in Zieher et al. 2016a beschrieben.

Rutschungsinventar Stufe A

Das Rutschungsinventar auf Stufe A beinhaltet verfügbare Archivdaten bis zum Stichtag 30. September 2012. Aus folgenden Archiven für Naturgefahren wurden mehr als 1200 Dokumente für die Bezirke Bregenz, Feldkirch und Dornbirn gesammelt und ausgewertet:

- BFW-ND: BFW Naturgefahren Ereignisdatenbank
- WLK.EKM: Digitale Naturgefahren-Ereigniskataster der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV)
- MB_GBA_Web und GEORIOS-Datenbank der Geologischen Bundesanstalt (GBA)
- Dokumentation der am 21./22. Mai 1999 im Laternsertal ausgelösten flachgründigen Rutschungen (Andrecs et al. 2002)
- Dokumentation der am 22./23. August in Vorarlberg ausgelösten flachgründigen Rutschungen (Markart et al. 2007)
- Dokumentation der Rutschungen und Murgänge in Vorarlberg für die Jahre 1999 und 2000 (Czurda et al. 2000, Wirth 2004)

Die Aufnahme der gesammelten Dokumente in das Rutschungsinventar auf Stufe A erforderte eine Verortung und Zuordnung des jeweiligen Rutschungsprozesses. Besonders wichtig war es dabei redundante Dokumente zu identifizieren, um mehrfache Einträge im Inventar zu vermeiden. Eine weitere Datenbank, aufgebaut von der Agrarbezirksbehörde (ABB) Vorarlbergs mit Sitz in Bregenz, wurde gesondert ausgewertet. In diesem Datensatz sind Ansuchen um Finanzbeihilfen enthalten, die für die Beseitigung von Schäden, die durch Naturgefahrenprozesse verursacht wurden verwendet werden. In der Datenbank der ABB sind für den Zeitraum von 1995 bis 2013 mehr als 3600 Einträge für ganz Vorarlberg enthalten. Die Verortung erfolgt in den meisten Fällen über die Parzelle. Redundanzen mit den weiteren Archivdaten können nicht ausgeschlossen und nicht beseitigt werden. Zudem definiert der Antragsteller die Prozessart selbst. Bei 1629 Einträgen wurde die Prozessart „Erdrutsch“ vergeben. 780 der eingetragenen Erdrutsche enthalten die Parzellennummer und den Tag der Auslösung. Die verbleibenden 849 Fälle konnten nur auf Gemeindeebene verortet werden. Eine exakte Verortung mit Hilfe von Orthophotos ist nicht möglich, da in den meisten Fällen die Rutschung (bzw. der reparierte Schaden) nicht mehr erkennbar ist. In Abb. 4 werden die Anzahl der in der ABB-Datenbank enthaltenden Einträge (rot), enthaltene Schäden durch Erdrutsche (orange) und verortete Einträge für Erdrutsche (grün) nach Jahren (a) und Monaten (b) dargestellt. Für den Zeitraum von 2009 bis 2012 sind keine Einträge mit einer Parzellennummer versehen. Generell wird dieser Datensatz mit Vorsicht behandelt, da sowohl die Verortung, die Datierung und die Prozessart nachgeprüft werden können. Dennoch können auf kleinem Maßstab aus der räumlichen Verteilung Rückschlüsse gezogen werden (Abb. 5).

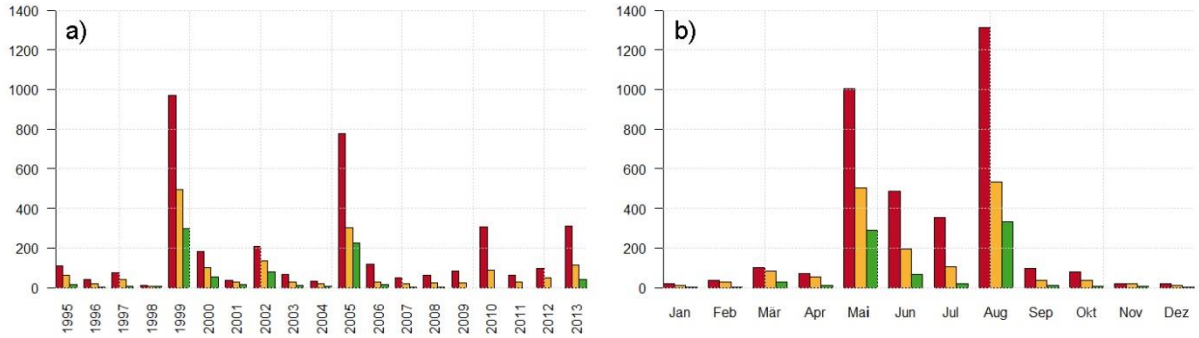

Abb. 4: Anzahl der in der ABB-Datenbank enthaltenden Einträge (rot), enthaltene Schäden durch Erdrutsche (orange) und verortete Einträge für Erdrutsche (grün) nach Jahren (a) und Monaten (b).

Abb. 5 zeigt eine Übersicht der 780 verorteten Schäden durch Erdrutsche aus dem ABB-Datensatz (a) und dem Rutschungsinventar auf Stufe A (b) im Vergleich mit der tektonischen Gliederung Vorarlbergs. Der ABB-Datensatz enthält Einträge aus ganz Vorarlberg, wogegen das Rutschungsinventar auf Stufe A auf die Bezirke Bregenz, Feldkirch und Dornbirn beschränkt war. Die räumliche Verteilung der Einträge beider Datensätze legt eine höhere Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen in Teilen Nordvorarlbergs nahe, vor allem in der Molasse und im Bereich des Penninikums (Flysch).

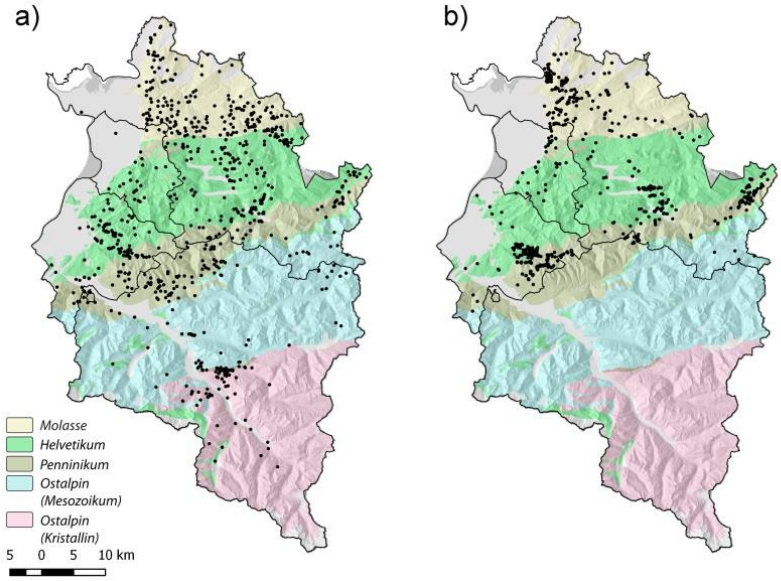

Abb. 5: Übersicht über die verorteten Schäden durch Erdrutsche aus dem ABB-Datensatz (a) und dem Rutschungsinventar auf Stufe A (b) mit der tektonischen Gliederung Vorarlbergs.

Rutschungsinventar Stufe B und C

Die Kartierung flachgründiger Rutschungen auf Stufe B und C basierte auf der visuellen Interpretation geomorphologischer Hinweise in Fernerkundungsdaten. Neben neun Orthophotoserien (195x, 197x, 198x, 199x, 2001, 2005, 2006, 2009, 2012) wurden Ableitungen von DGMs, die von zwei flugzeug-gestützten Laserscanning (airborne laser scanning, ALS) Aufnahmen stammen (2004 und 2011) für die Kartierung verwendet. Hinweise auf flachgründige Rutschungen mussten zumindest in einer Orthophotoserie nachweisbar sein, damit die Rutschung in das Inventar aufgenommen werden konnte. Hinweise in den DGMs alleine reichten dazu nicht aus, da vor allem in bewaldeten Gebieten Artefakte aus der Prozessierung der ALS-Daten (z.B. Filterung der Bodenpunkte) mit der morphologischen Ausprägung flachgründiger Rutschungen verwechselt werden könnten. Die Kartierung erfolgte auf einem Maßstab von 1:400, um zu gewährleisten, dass alle relevanten Rutschungsmerkmale mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden konnten. Retrograde Erosionsformen in den aufeinander folgenden Orthophotoserien wurden nicht als primäre Rutschung betrachtet und daher nicht kartiert. Bislang gibt es keine international anerkannten Standards für die Erstellung von Rutschungsinventaren. Häufig werden Rutschungsmerkmale als Kombination von

Punkten, Linien und Polygonen erfasst (z.B. Trigila et al. 2010, Guzzetti 2012). Im Datenmodell des erstellten Rutschungsinventars wurden folgende Rutschungsmerkmale berücksichtigt (Abb. 6):

- Punkt im Zentrum des Anbruchfläche (Anrisspunkt; scar point)
- Punkt im Zentrum der größten Ablagerung (Ablagerungspunkt; deposition point)
- Linie entlang des Auslaufes vom Anrisspunkt bis zum unteren Ende (Auslaufpfad; process trajectory)
- Abgrenzung der gesamten sichtbaren Prozessfläche (Prozesspolygon; process area)
- Abgrenzung der Anbruchfläche (scar area)

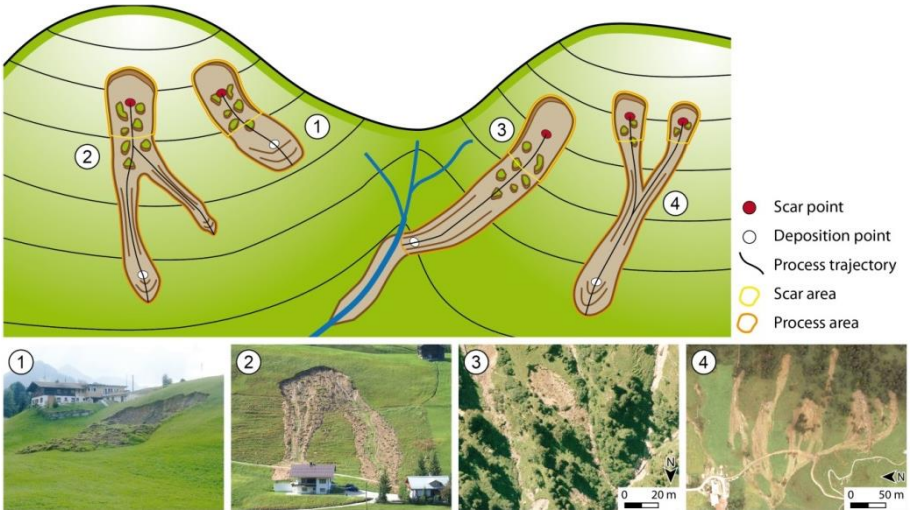

Abb. 6: Verschiedene topologische Konfigurationen flachgründiger Rutschungen und ihre Aufnahme in das Datenmodell des Rutschungsinventars (Zieher et al. 2016a)

Das entwickelte Datenmodell ist geeignet, um bestehende Archivdaten und zukünftige Dokumentationen von Rutschungsereignissen nach den in Österreich gängigen Standards (Hübl et al., 2002) zu integrieren. Es ist darüber hinaus ausreichend flexibel, um verschiedene topologische Konfigurationen flachgründiger Rutschungen berücksichtigen zu können, als auch das Fehlen von Rutschungsmerkmalen, falls diese nicht in den Fernerkundungsdaten erkennbar sind. Weitere Attribute, wie Landnutzung oder Hangtyp können vergeben werden (Abb. 7). Diese Attribute werden in thematischen Tabellen gespeichert. Dabei erhält jede kartierte flachgründige Rutschung einen Primärschlüssel, über den sämtliche Attribute abgefragt werden können.

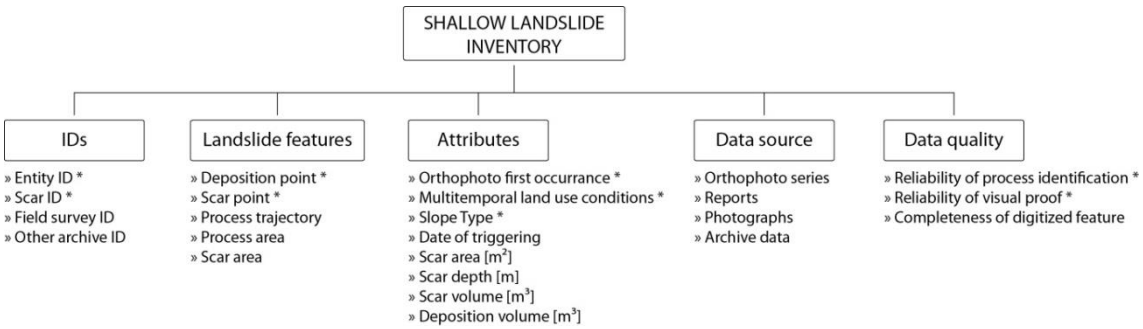

Abb. 7: Inhalt des Rutschungsinventars (Zieher et al., 2016a). Attribute, die mit einem Stern (*) gekennzeichnet sind, müssen vergeben werden und sind für alle kartierten flachgründigen Rutschungen auf Stufe B und C verfügbar.

Jede kartierte flachgründige Rutschung auf Stufe B besteht aus einem Ablagerungspunkt und einem oder mehreren Anrisspunkten. Die Punkte wurden jeweils im visuellen Mittelpunkt der Ablagerung und des/der Anbruchfläche(n) gesetzt. Falls ausreichend sichtbar, wurde der Auslaufpfad der Rutschung digitalisiert. Insgesamt wurden 2379 flachgründige Rutschungen kartiert. In Tabelle 2 sind alle kartierten Rutschungsmerkmale für die drei Untersuchungsgebiete aufgelistet.

Tabelle 2: Anzahl kartierter Rutschungsmerkmale nach Untersuchungsgebiet.

Rutschungs-merkmale	Region Laterns	Region Au/Schnepfau	Kleinwalsertal	Gesamt
Anrisspunkt	1193	546	640	2379
Ablagerungspunkt	1079	491	566	2136
Auslaufpfad	773	225	364	1362
Prozesspolygon	831	340	428	1599
Anbruchfläche	384	-	-	384

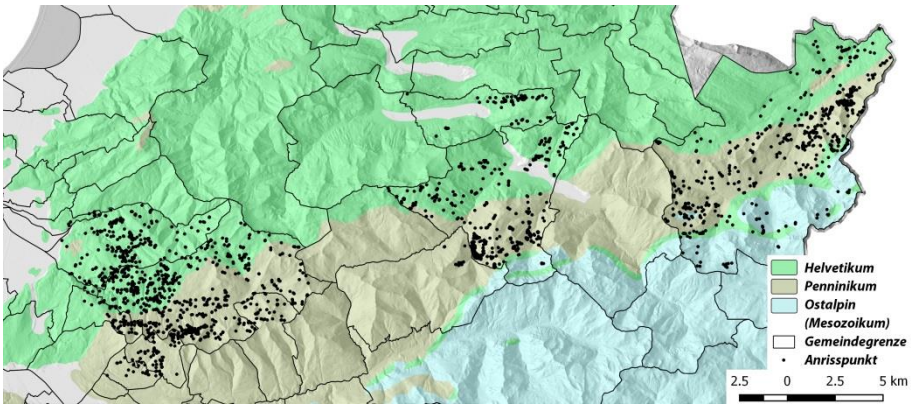

Abb. 8: Räumliche Verteilung der kartierten Anrisspunkte des Inventars der Stufe B.

Multitemporales Rutschungsinventar

Für die Kalibrierung und Validierung dynamischer (zeitabhängiger) physikalisch-basierter Modelle, ist eine ausreichende Anzahl an exakt verorteter und datierter Rutschungen erforderlich. In dem erstellten mehrjährigen Rutschungsinventar auf Stufe B und C können ein Großteil der kartierten flachgründigen Rutschungen nur einem Zeitraum zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Orthophotoserien zugeordnet werden. Lediglich die im Feld kartierten Rutschungen nach den auslösenden Niederschlagsereignissen vom Mai 1999 (Andrecs et al. 2002) und August 2005 (Markart et al. 2007) konnten direkt datiert werden. Darüber hinaus wurde versucht, die kartierten Rutschungen ihren auslösenden Ereignissen zuzuordnen und damit relativ zu datieren (Abb. 9). Dies war letztlich nur für Rutschungen, die in der Orthophotoserie von 2006 kartiert wurden möglich, die dem auslösenden Ereignis vom 22./23. August zugeordnet wurden.

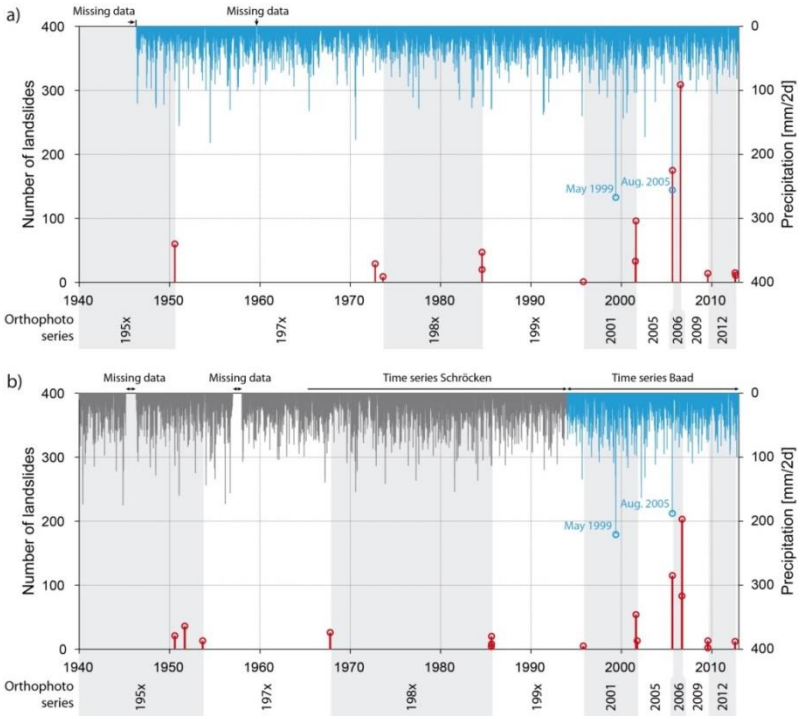

Abb. 9: Anzahl kartierter flachgründiger Rutschungen in den neun Orthophotoserien (rote Balken und Kreise) im Vergleich mit der zweitägigen Niederschlagssumme (blaue und graue Balken) ausgewählter meteorologischer Stationen im Laternsertal (Innerlaterns) (a) und Kleinwalsertal (Baad – blau, Schröcken – grau) (Zieher et al. 2016a). Datenquelle: Hydrographischer Dienst Vorarlberg.

Aus dem mehrjährigen Rutschungsinventar der Stufe B und C wurde ein multitemporales Inventar für das Laternsertal abgeleitet, welches nur noch Rutschungen beinhaltet, die einem auslösenden Ereignis zugeordnet werden konnten. Dieses Inventar enthält Rutschungen für die auslösenden Niederschlagsereignisse vom 21./22. Mai 1999 und 22./23. August 2005.

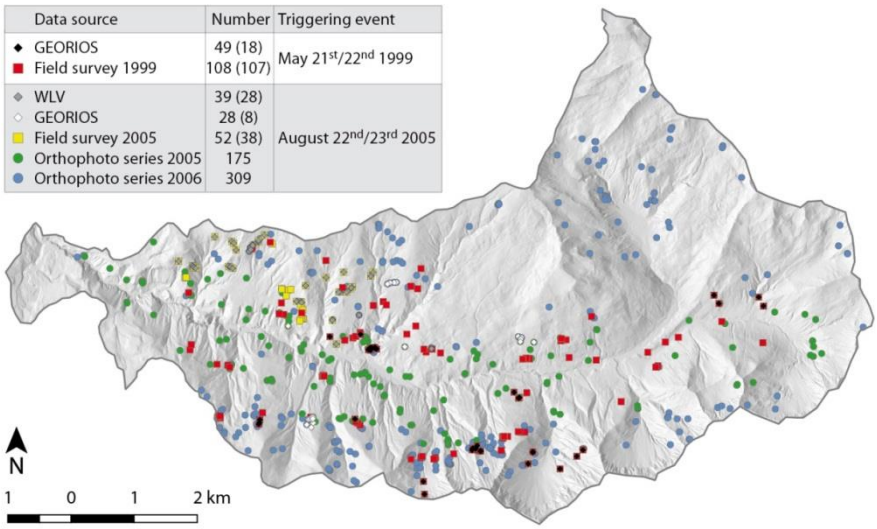

Abb. 10: Kartierte Anrisspunkte für das Laternsertal mit bekanntem oder abgeleitetem Auslösedatum. Die Zahl in den Klammern entspricht der Anzahl der im Gelände kartierten Rutschungen bzw. den vorhandenen Archivdokumenten. In einigen Fällen gibt es redundante Informationen (Zieher et al. 2016a).

Laborversuche und Feldexperimente

Laborversuche und Eingangsparameter

Dynamische, physikalisch-basierte Hangstabilitätsmodelle benötigen zahlreiche Eingangsparameter, wobei im Idealfall auch ihre räumliche Ausprägung und Variabilität bekannt sein sollte (Tabelle 3). Das Modell TRIGRS 2.0 besteht aus einer hydrologischen Komponente (Niederschlags-Abflussmodell, Infiltrationsmodell) und einer geomechanischen Komponente (Modell der unendlich langen Böschung). Die Anwendbarkeit des Modells hängt von einer Vielzahl von Annahmen ab. Ein Ziel war es, die Anwendbarkeit der hydrologischen Modellkomponente in einem Feldexperiment auf Plotskala (100 m²) nachzuvollziehen und zu testen. Zudem wurde das Modell um drei Parameter erweitert (Durchwurzelungskohäsion, Vegetationsauflast, Durchwurzelungstiefe), um die Wirkung der hohen Vegetation auf die Hangstabilität berücksichtigen zu können. Alle notwendigen Eingangsparameter wurden anhand geotechnischer Laborversuche, Geländeaufnahmen und aus einem Literaturreview bestimmt. Für die Kalibrierung des Modells wurden vier sensitive Parameter, die in einer lokalen Sensitivitätsanalyse identifiziert wurden, systematisch getestet und optimiert (für Details siehe Zieher et al. 2017b).

Für die Bestimmung der geotechnischen Eingangsparameter wurden an acht Rutschungsanrissen im Laternsertal geotechnische Proben entnommen. An der abgestochenen Anrisskante wurden in zwei Tiefenstufen jeweils zwei ungestörte und eine gestörte Probe geworben. Die ungestörten Proben wurden mithilfe von Stechzylindern (Durchmesser 9.6 cm) entnommen und luftdicht gelagert. Die Korngrößenverteilungen, Feucht- und Trockendichte sowie der natürliche Wassergehalt wurden für alle ungestörten Proben ermittelt (Abb. 11b). Mit den gestörten Proben der unteren Tiefenstufe wurden die geotechnischen Parameter bestimmt (Abb. 11a,c,d). Anhand der Proben aus der oberen Tiefenstufe wurde die Kompressibilität des Lockermaterials mittels Ödometerversuchen (Rowe und Barden 1966, Abb. 11c) bestimmt. Daraus kann der spezifische Speicherkoeffizient abgeleitet werden (Zieher et al. 2017a, 2017b). In Tabelle 4 sind die Metadaten zu den Probestellen sowie die Ergebnisse der Laborversuche aufgelistet.

Tabelle 3: Eingangsparameter des Modells TRIGRS 2.0 und angenommene Parameterwerte in ausgewählten Publikationen (verändert nach Zieher et al. 2017b).

Parameter	Nieder-schlags-intensität	Hang-neigung	Locker-material-mächtigkeit	Initiale Tiefe des Berg-wasser-spiegels	Hinter-grund-Infiltrations-rate	Innerer Reibungs-winkel	Kohäsion	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	Hydrau-lische Diffusivität	Wichte des Locker-materials	Durch-wurzelungs-kohäsion	Vegeta-tions-auflast	Durch-wurzelungs-tiefe	Anzahl an Eigenschaft-s-zonen
Abkürzung	P	β	d_{max}	d_{wi}	Iz	φ'	c'	K_s	D_0	γ	c_r	s_t	d_r	-
Einheit	m/s	Grad	m	m	m/s	Grad	kPa	m/s	m2/s	kPa	kPa	kPa	m	
Salciarini et al. 2006	Stations-daten	DHM (5 x 5 m)	Funktion der Hangneigung	0, 25, 50 und 100% von d_{max}	-	18.00 - 40.00	4.00 - 100.00	10^{-8} - 10^{-4}	-	18.00 - 22.00	-	-	-	5
Zizioli et al. 2013	Stations-daten	DHM (10 x 10 m)	Geomorpho-logisch indexiertes Modell	0.75 m unter der Oberfläche	-	22.00 - 33.70	0.00 - 10.00	1.50×10^{-5} - 1.00×10^{-4}	-	17.46 - 19.91	-	-	-	4
Vieira et al. 2010	Stations-daten	DHM (2 x 2 m)	Konstanter Wert (1.0, 2.0 und 3.0 m)	d_{max}	1.00×10^{-9}	34	1.00; 6.00	1.00×10^{-6}	5.5×10^{-5}	17.10; 14.30	-	-	-	1
Park et al. 2013	Stations-daten	DHM (10 x 10 m)	Konstanter Wert (2.0 m)	d_{max}	$0.01 \times K_s$	29.63	10.17	1.30×10^{-5}	$200 \times K_s$	18.38	-	-	-	1
Kim et al. 2013*	Stations-daten	DHM (5 x 5 m)	Spline-Interpolation punktueller Messungen	d_{max}	4.50×10^{-9}	34	5.2	4.50×10^{-5}	-	14.71	3	2.9	-	1

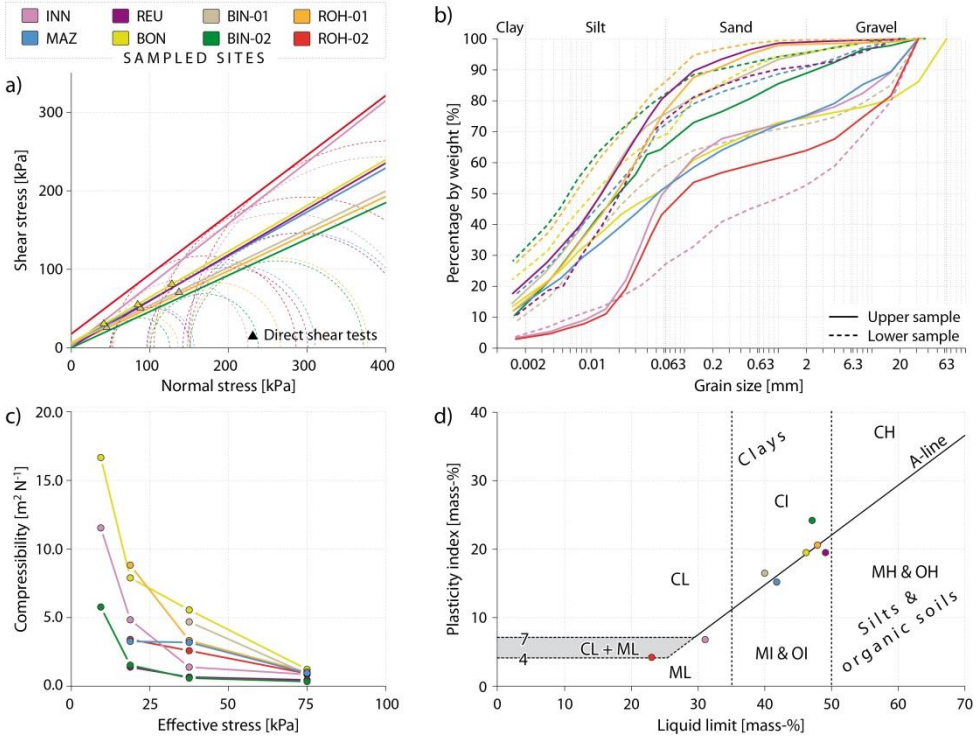

Abb. 11: Ergebnisse der durchgeführten Scherversuche (a), Korngrößenverteilungen (b), Ödometertests (c) und Atterberg'schen Zustandsgrenzen (d) für die geotechnischen Proben von acht Probestandorten in dem Laternsertal (Zieher et al. 2017b).

Ein wesentlicher Eingangsparameter für physikalisch-basierte Hangstabilitätsmodelle ist die Mächtigkeit des Lockermaterials. Für die flächendeckende Abschätzung dieses Parameters für das gesamte Laternsertal wurden 126 Rammsondierungen (DCPTs) entlang von Hangtransekten durchgeführt. Dazu wurde eine leichte Rammsonde mit einem Fallgewicht von 10 kg verwendet, welches aus einer Höhe von 0.5 m auf einen Amboss von 6 kg fallen gelassen wird (ÖNORM EN ISO 22476-2:2012).

Tabelle 4: Metadaten der acht Probeentnahmestellen. *Ergebnisse für eine Tiefe von 2.0 m. Datenquelle: Zieher et al. 2017b

Parameter	Einheit	INN	MAZ	REU	BON	BIN-01	BIN-02	ROH-01	ROH-02
Geogr. Breite	Grad	47.2572	47.2679	47.2647	47.2673	47.2722	47.2737	47.269	47.2699
Geogr. Länge	Grad	9.7381	9.7352	9.7144	9.7256	9.704	9.7087	9.698	9.7001
Beprobungstiefe 1	cm	56	37	34	30	45	42	41	-
Beprobungstiefe 2	cm	72	67	56	80	92	72	65	108
Innerer Reibungswinkel	Grad	38.1	29.3	30.3	30.3	25.9	24.8	25.3	37.2
Kohäsion	kPa	1.3	4.6	0.8	6.2	5.6	0	3.7	17.6
Steifemodul*	kPa	1050	470	2040	240	1400	2740	400	750
Spezifischer Speicherkoeffizient *	1/m	0.037	0.031	0.007	0.061	0.011	0.005	0.037	0.02
Ausrollgrenze	Massen-%	24.2	26.6	29.6	26.8	23.5	22.8	27.3	18.9
Fließgrenze	Massen-%	31.1	41.8	49.1	46.2	40	47.1	47.9	23.1
Trockendichte	g/cm³	1.43	1.45	1.27	1.37	1.36	1.84	1.25	1.99
Porosität	%	45.2	45.1	52.4	48.9	46.3	29.8	52.3	25.5
Bodenart	-	Ton/ Schluff	Schluff	Schluff	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton/ Schluff

Das Laternsertal ist in etwa zur Hälfte bewaldet. Die Wälder werden vor allem von Fichten (*Picea abies* L. Karsten) und Tannen (*Abies alba* Miller) dominiert. Buchen (*Fagus sylvatica* L.) treten unterhalb von etwa 1300 m auf (Amann 2014). Bebaute Flächen machen in etwa 1,2% der Einzugsgebietsfläche aus. Die verbleibende Fläche wird von Wiesen und Weiden oder einer Kombination aus beidem eingenommen. Zahlreiche Studien haben die stabilisierende Wirkung von Baumwurzeln nachgewiesen (z.B. Schmitt et al. 2001, Steinacher et al. 2009), wogegen die Auswirkungen der Vegetation auf die Hanghydrologie während rutschungsauslösender Niederschlagsereignisse vernachlässigbar ist (z.B. Kim et al. 2013). Um die Wirkung der hohen Vegetation auf die Hangstabilität mit dem Modell TRIGRS 2.0 berücksichtigen zu können, wurde das Modell um drei Parameter erweitert. Nach Kim et al. (2013) wurde der geomechanischen Modellkomponente um die laterale Durchwurzelungskohäsion, die Vegetationsauflast und die Durchwurzelungstiefe erweitert. Anstatt eines konstanten Wertes für die Durchwurzelungskohäsion zu addieren (z.B. Kim et al. 2013), wurde ein linearer Anstieg des Parameters mit der Tiefe angenommen, um der räumlichen Verteilung der Wurzeln Rechnung zu tragen (z.B. Bischetti et al. 2005, Bischetti et al. 2009). Die drei zusätzlichen Parameter können entweder konstant angenommen werden, oder als Parameterkarten mit räumlich berücksichtigt werden.

Anhand des normalisierten Oberflächenmodells von 2011 wurde eine Karte der Waldfläche erstellt. Innerhalb der abgeleiteten Waldfläche gehen die Vegetationsparameter in das Modell TRIGRS 2.0 ein. Für die Vegetationsparameter wurden konstante, konservative Werte aus der Literatur übernommen. Die Durchwurzelungskohäsion wurde mit 2.5 kPa angenommen (z.B. Bischetti et al. 2009, Steinacher et al. 2009), die Vegetationsauflast mit 2.5 kPa (z.B. Steinacher et al. 2009) und die Durchwurzelungstiefe mit 1.0 m (z.B. Bischetti et al. 2009, Kutschera und Lichtenegger 2002).

Feldexperiment

Um das Verhalten der hydrologischen Modellkomponente im Gelände zu testen, wurde ein Dauerberegnungsversuch an einem rutschungsanfälligen Hang im Laternsertal auf Plotskala (100 m², 20 x 5 m) durchgeführt. An dem gewählten Hang wurden im August 2005 an mehreren Stellen flachgründige Rutschungen ausgelöst. Die Infiltration des künstlich aufgebrachten Niederschlags wurde mit Hilfe eines Geoelektrik-Monitorings (time-lapse electrical resistivity tomography; ERT) und installierten TDR-Sonden verfolgt (Abb. 12). Zudem wurde der Lockermaterialaufbau in und um die Beregnungsanlage mit Rammsondierungen untersucht. Die beobachtete Reduktion des elektrischen Widerstands bedingt durch den ansteigenden Wassergehalt im Boden wurde anschließend mit einem linearen Diffusionsmodell nach Iverson (2000) nachgebildet. Dieses Diffusionsmodell ist auch Bestandteil des physikalisch-basierten Hangstabilitätsmodells TRIGRS 2.0 (Baum et al. 2008, 2010). Dieses Modell wurde später flächendeckend für die drei Untersuchungsgebiete angewendet. Anhand des Feldexperiments konnte nachgewiesen werden, dass die hydrologische Modellkomponente in der Lage ist, die mittlere Veränderung des Wassergehalts bzw. des Porenwasserdrucks auf Plotskala zeitlich plausibel abzubilden. Details zu dem Beregnungsversuch können in Zieher et al. 2017a nachgelesen werden.

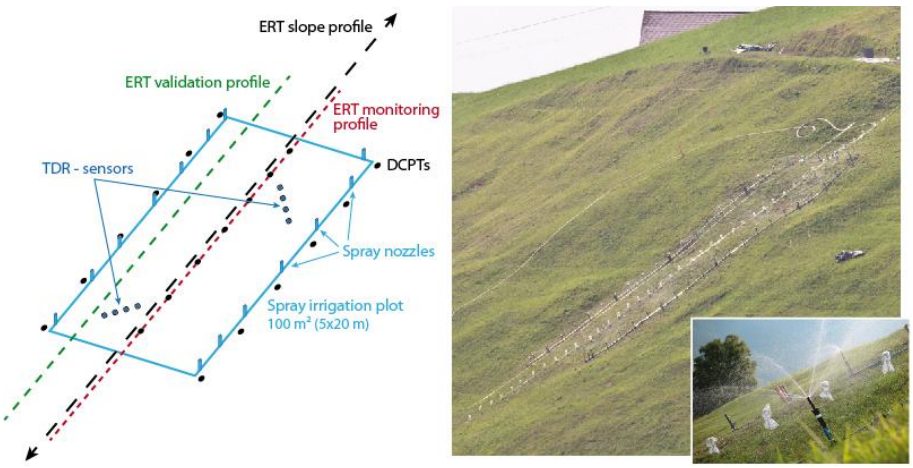

Abb. 12: Setup und Aufbau des Beregnungsversuches im Gelände. DCPTs: Rammsondierungen (dynamic cone penetration tests), ERT: elektrische Widerstandstomographie (electrical resistivity tomography), TDR: Zeitbereichsreflektometrie (time-domain reflectometry) (Zieher et al. 2017a).

Die Ergebnisse des Geoelektrik-Monitorings zeigen eine graduelle Reduktion des elektrischen Widerstandes mit der Tiefe über die Zeit (Abb. 13). Die Widerstandsreduktion geht einher mit der Zunahme des Wassergehalts im Boden bedingt durch die künstliche Beregnung. In etwa eine Stunde nach dem Beginn des Experiments, treten keine Veränderungen des elektrischen Widerstands mehr ein. Die beobachtete Infiltration des aufgebrachten Niederschlags ist vor allem für die obersten 100 cm beobachtbar. Die Ergebnisse der Rammsondierungen legen nahe, dass – mit Ausnahme des obersten Bereichs der beregneten Fläche – die Wasserfront das anstehende Gestein noch nicht erreicht hatte.

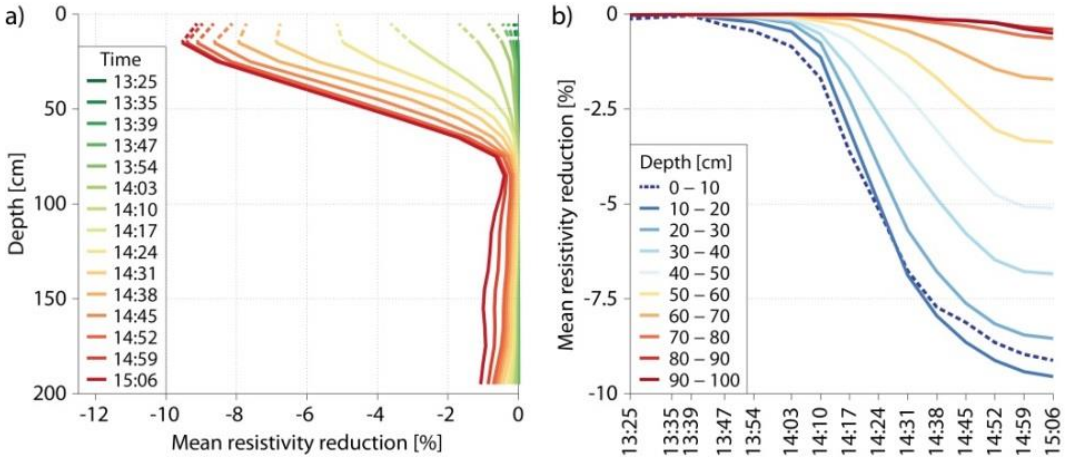

Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Widerstandsreduktion für den Abschnitt der Beregnungsanlage. Mittlere Widerstandsreduktion mit der Tiefe für die einzelnen Messungen (a) und Zeitreihen der mittleren Widerstandsreduktion für diskrete Tiefenstufen bis 2.0 m (Zieher et al. 2017a).

Die mittlere relative Widerstandsreduktion wurde anschließend zu Wassergehalt bzw. Bodenwasserspannung skaliert (Abb. 14). Diese Ergebnisse konnten mit dem Diffusionsmodell nach Iverson (2000) gut nachvollzogen werden.

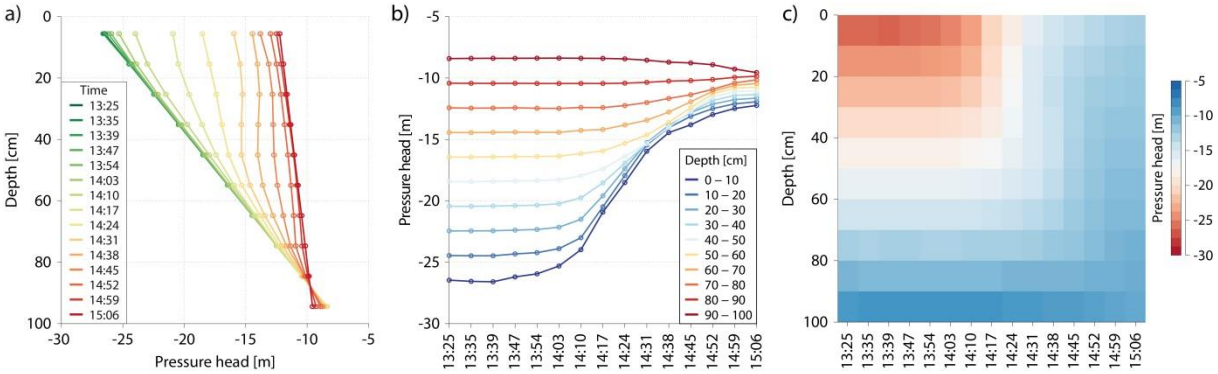

Abb. 14: Skalierte Bodenwasserspannung aus der mittleren Widerstandsreduktion. Bodenwasserspannung mit der Tiefe für die einzelnen Messungen (a), Zeitreihen der Bodenwasserspannung für diskrete Tiefenstufen (b) und Bodenwasserspannung über Tiefe und Zeit (c) (Zieher et al. 2017a).

Dynamische, physikalisch-basierte Modellierung

Modellkalibrierung

Für die Modellkalibrierung wurden die geotechnischen und hydrologischen Parameter als räumlich konstant betrachtet. Die Vegetationsparameter wurden nur innerhalb der bewaldeten Flächen berücksichtigt. Als Niederschlagsinput wurden für die Ereignisse vom Mai 1999 und August 2005 stündliche Niederschlagskarten mittels Spline-Interpolation berechnet. Abb. 15 zeigt die stündlichen Niederschlagssummen und die Karte der Niederschlagssumme für die Ereignisse am 21./22. Mai 1999 (a,b) und 22./23. August 2005 (c,d). Unterschiede sind vor allem im zeitlichen Verlauf der Niederschlagsintensität erkennbar (August 2005: kurz und sehr hohe Intensitäten; Mai 1999: langanhaltend und geringere Intensitäten). Die Niederschlagssumme ist für beide Ereignisse ähnlich hoch (Mai 1999: 263 mm; August 2005: 252 mm). Alle Eingangsparameterkarten wurden mit der Projektion MGI Austria GK West (EPSG-Code 31254) aufbereitet.

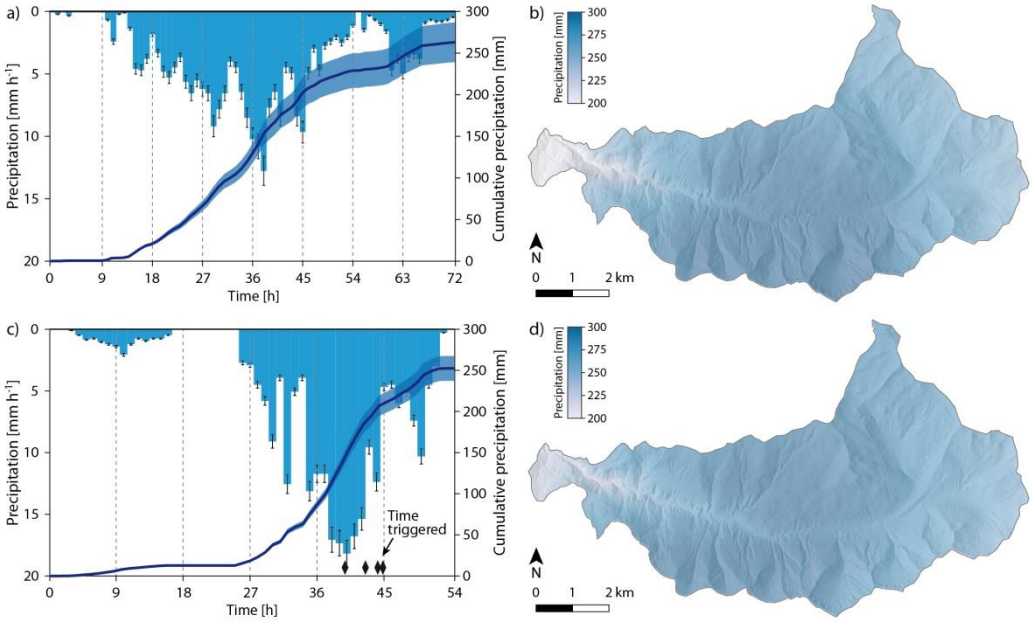

Abb. 15: Zeitreihe des stündlichen Niederschlags (a,c) und räumlich interpolierte Niederschlagssumme (b,d) für die rutschungsauslösenden Niederschlagsereignisse vom Mai 1999 (a,b) und August 2005 (c,d). Die Fehlerbalken in (a) und (c) zeigen den Wertebereich der interpolierten Niederschlagskarten über die Fläche des Einzugsgebietes (Zieher et al. 2017b).

Bei der Kalibrierung physikalisch-basierter Modelle sollten generell nur sensitive Parameter (i.e. Parameter, die einen merklichen Einfluss auf das Ergebnis des Modells haben) einbezogen werden (z.B. Bathurst et al. 2005, Wagener et al. 2007). Anhand einer lokalen Sensitivitätsanalyse (eine repräsentative Rasterzelle) wurde der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf den resultierenden FOS getestet (one-at-a-time sensitivity analysis OAT; siehe Zieher et al. 2017b). Vier sensitive Parameter (innerer Reibungswinkel, Kohäsion, hydraulische Leitfähigkeit, spezifischer Speicherkoeffizient) wurden identifiziert und anschließend kalibriert. Jede Parameterkombination aus jeweils 10 definierten Parameterwerten wurde für das auslösende Ereignis vom August 2005 getestet und validiert. Aus den 10000 Modelldurchläufen (10^4 Parameterkombinationen) wurden 25 „plausible Durchläufe“ (Durchläufe, die den Beobachtungen entsprechen) basierend auf den folgenden Beobachtungen und Annahmen selektiert:

1) Am Beginn der Simulationen sind alle Flächen stabil (keine Rutschungen vor dem Einsetzen des auslösenden Niederschlags)
2) Die meisten Rutschungen wurden nach der Phase der maximalen Niederschlagsintensität ausgelöst (Zeitschritt 6, nach 45h)
3) Die optimalen Parameterkombinationen können aus jenen Simulationen abgeleitet werden, die die meisten beobachteten Rutschungen und die meisten stabilen Flächen korrekt vorhersagen, während gleichzeitig die ersten beiden Annahmen erfüllt werden

Abb. 16 zeigt die zeitabhängigen Vorhersageraten aller 10000 Modelldurchläufe (Abb. 16a), die 7300 Durchläufe, die Annahme 1 erfüllen (Abb. 16b), die 1134 Durchläufe, die Annahme 2 erfüllen (Abb. 16c) und die 25 selektierten, plausiblen Durchläufe (Modellensemble), die die meisten beobachteten Rutschungen und stabilen Flächen vorhersagen (Abb. 16d). Die resultierenden Parameterwerte des Modellensembles decken verschiedene Materialeigenschaften ab – von Sanden bis Tonen (Prinz und Strauß 2011).

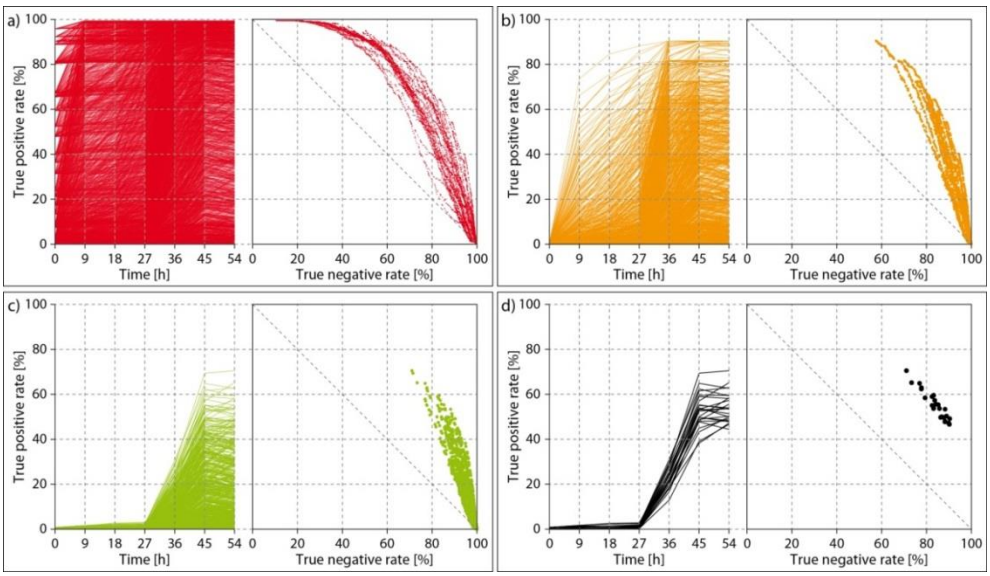

Abb. 16: Zeitabhängige Vorhersageraten flachgründiger Rutschungen für die sieben berücksichtigten Zeitschritte und Anteile korrekt vorhergesagter Rutschungen (true positives) und stabilen Flächen (true negatives) für einen Sicherheitsfaktor (factor of safety, FOS) unter 1,0. a) Alle 10000 Durchläufe, b) Durchläufe, die die erste Annahme erfüllen (stabil bei t=0; n=7300), c) Durchläufe, welche die zweite Annahme erfüllen (Auslösung nach der maximalen Niederschlagsintensität; n=1134) und d) die 25 Durchläufe (Modellensemble), die die meisten Rutschungen und stabilen Flächen korrekt vorhersagen (Zieher et al. 2017b).

Mit den Parametern des Modellensembles ist es damit möglich, den zeitlichen Verlauf der Hangstabilität als Reaktion auf einen zeitlich variierenden Niederschlagsinput abzubilden (Abb. 17). Mit zunehmendem Porenwasserdruck, der wiederum von der infiltrierenden Niederschlagsmenge abhängt, nimmt die Hangstabilität über die Zeit ab. Nach der maximalen Niederschlagsintensität (Zeitschritt 6, nach 45h) fällt der FOS an den meisten beobachteten Rutschungen unter 1,0 und sagt damit ein Hangversagen voraus. Das Modell ist damit ausreichend kalibriert, um flachgründige Rutschungen raumzeitlich korrekt vorherzusagen.

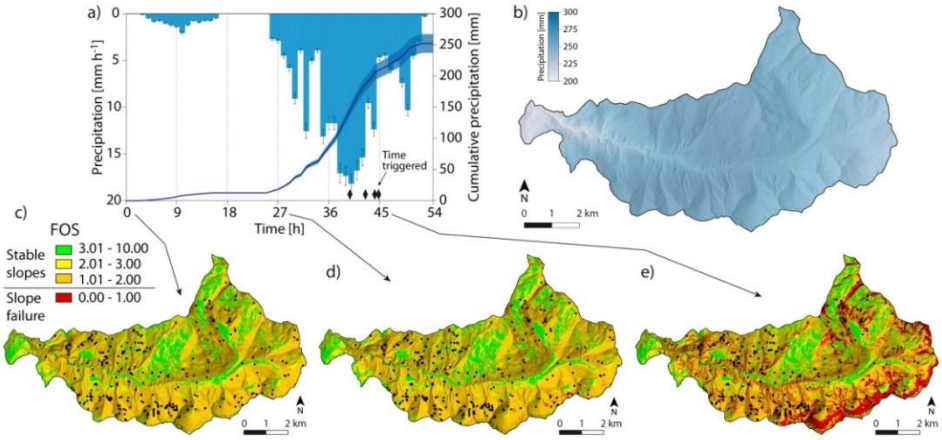

Abb. 17: Entwicklung des FOS in Abhängigkeit des eingehenden Niederschlags am Beispiel des auslösenden Ereignisses vom 22./23. August 2005.

Validierung des Modelensembles

Die Modellkalibrierung erfolgte anhand des Niederschlagsereignisses im August 2005. Anschließend wurde das Modellensemble mit den stündlichen Niederschlagskarten des Ereignisses vom Mai 1999 angetrieben. Obwohl sich der zeitliche Verlauf der Niederschlagsintensitäten der beiden Ereignisse stark unterscheidet (22./23 August 2005: kurz mit sehr hohen Intensitäten; 21./22. Mai 1999: langanhaltend mit geringeren Intensitäten) werden abermals die meisten beobachteten flachgründigen Rutschungen nach der maximalen Niederschlagsintensität (Zeitschritt 6, nach 45h) vorhergesagt (Abb. 18). Für das Ereignis vom Mai 1999 wurden zusätzlich drei Szenarien der gebietsweiten Vorbefeuchtung berücksichtigt. Die besten Ergebnisse werden bei einem initialen Hangwasserspiegel von 0.25% der Lockermaterialmächtigkeit erzielt.

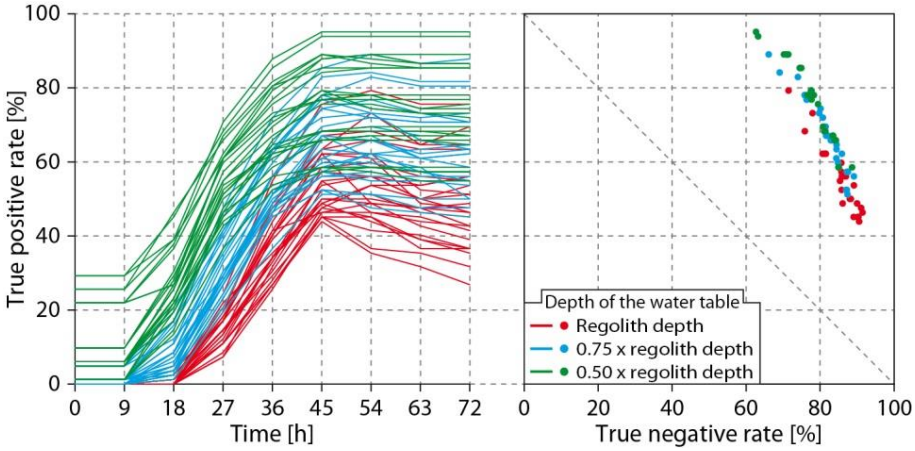

Abb. 18: Zeitabhängige Vorhersagerate des Modellensembles und Anteile korrekt vorhergesagter Rutschungen (true positives) und stabilen Flächen (true negatives) für einen Sicherheitsfaktor (factor of safety, FOS) unter 1,0 für das auslösende Ereignis vom 21./22. Mai 1999 (Zieher et al. 2017b).

Während die 25 selektierten Durchläufe des Modellensembles weitgehend mit Beobachtungen übereinstimmen, sind ihre Abweichungen voneinander ein Maß für die Unsicherheit des Ensembles. In Abb. 19 werden die Ergebnisse des Modellensembles für beide Niederschlagsereignisse dargestellt. Die Farben in Abb. 19a und Abb. 19b zeigen die Anzahl an Modelldurchläufen, die an den einzelnen Rasterzellen ein Hangversagen vorhersagen. Rote Flächen deuten eine hohe Übereinstimmung des Modellensembles an, während gelbe Flächen darauf hinweisen, dass nur einzelne Durchläufe des Ensembles Rutschungen vorhersagen. Die entsprechenden Koordinaten in einem receiver operating characteristic (ROC) Diagramm sind in Abb. 19c für das Ereignis vom August 2005 und Abb. 19f für das Ereignis vom Mai 1999. Flächen, an denen von nur einem Durchlauf des Ensembles ein Hangversagen vorhergesagt wird, enthalten die meisten beobachteten Rutschungen (hohe TPR) wobei gleichzeitig weniger stabile Flächen korrekt vorhergesagt werden (niedrige TNR). Flächen, auf denen alle 25 Durchläufe übereinstimmen, weisen weniger beobachtete Rutschungen auf (geringere TPR) wogegen mehr stabile Flächen korrekt vorhergesagt werden (höhere TNR). Die Vorhersageraten der 25 Durchläufe des Modellensembles sind in Abb. 19d für das Ereignis vom August 2005 und Abb. 19e für das Ereignis vom Mai 1999 dargestellt. Generell können die beobachteten Rutschungen vom Mai 1999 etwas besser vorhergesagt werden.

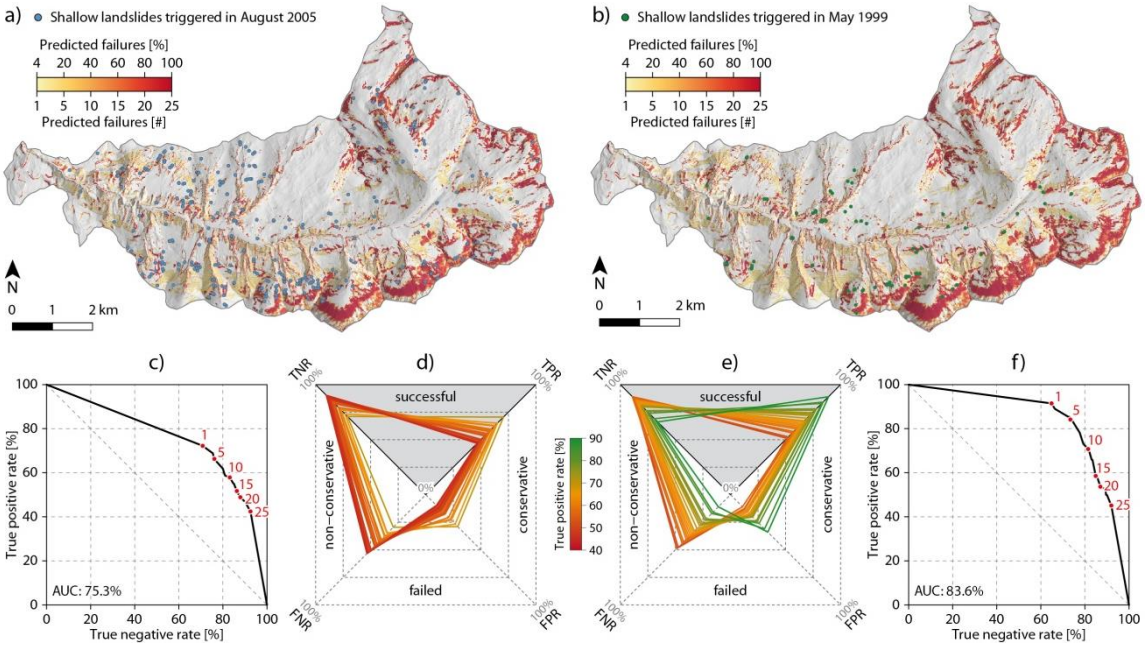

Abb. 19: Evaluierung und Vergleich der Ergebnisse des Modellensembles für die auslösenden Ereignisse vom 21./22. Mai 1999 (a) und 22./23. August 2005 (b) (Zieher et al. 2017b).

Das identifizierte und validierte Modellensemble wurde anschließend in den anderen beiden Untersuchungsgebieten für das Niederschlagsereignis vom August 2005 angewendet. Obwohl das Modell im Laternsertal kalibriert wurde, liefert das Ensemble auch in den Untersuchungsgebieten Au/Schnepfau (Abb. 20a) und Kleinwalsertal (Abb. 20b) vergleichbar gute Ergebnisse.

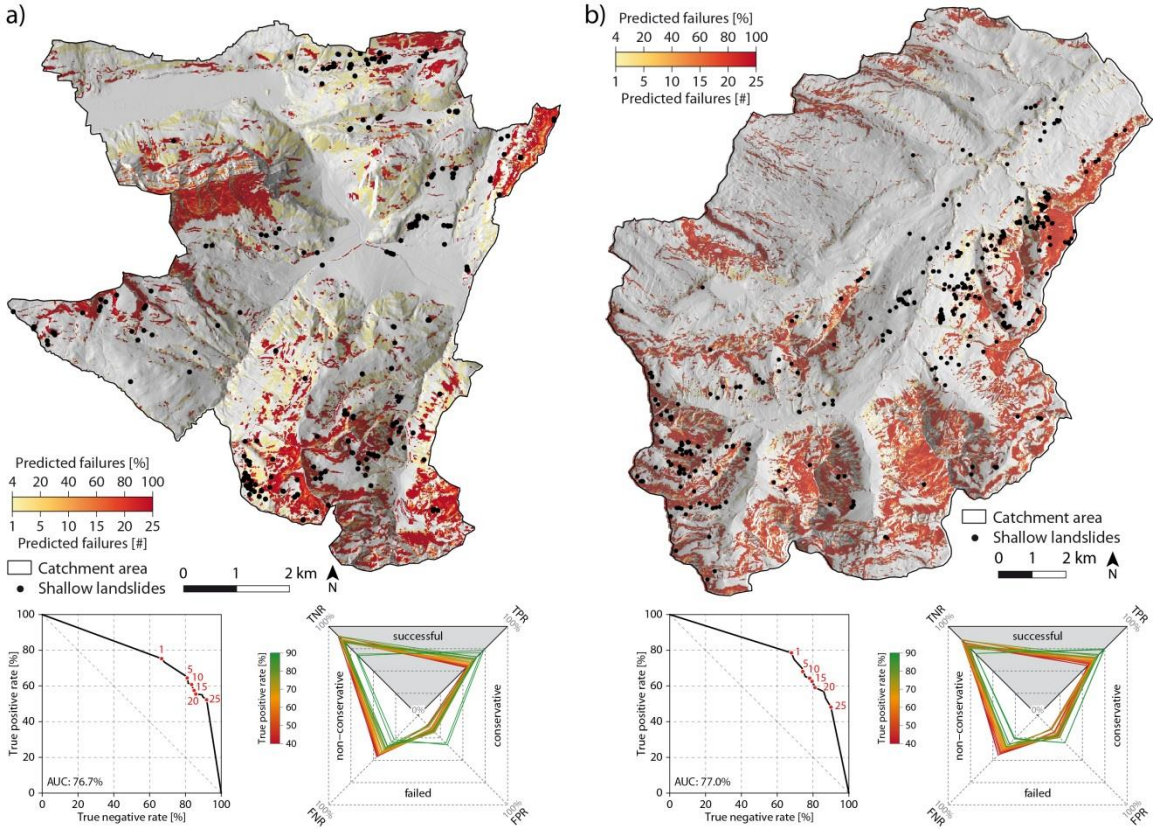

Abb. 20: Anwendung des Modellensembles in den Untersuchungsgebieten Au/Schnepfau (a) und dem Kleinwalsertal (b).

Für die Abschätzung der potenziellen Auslaufbereiche der vorhergesagten Rutschungen, wurde ein empirisches Auslaufmodell (Mergili et al. 2015) verwendet. Dazu wurde das Pauschalgefälle der Fahrböschung (z.B. Heim 1932, Scheidegger 1973, Mergili et al. 2015) anhand von 48 vollständig kartierten flachgründigen Rutschungen kalibriert (Abb. 21). Das resultierende mittlere Pauschalgefälle (25,7°) wurde anschließend für die Vorwärtsmodellierung für alle vorhergesagten Rutschungen angewendet.

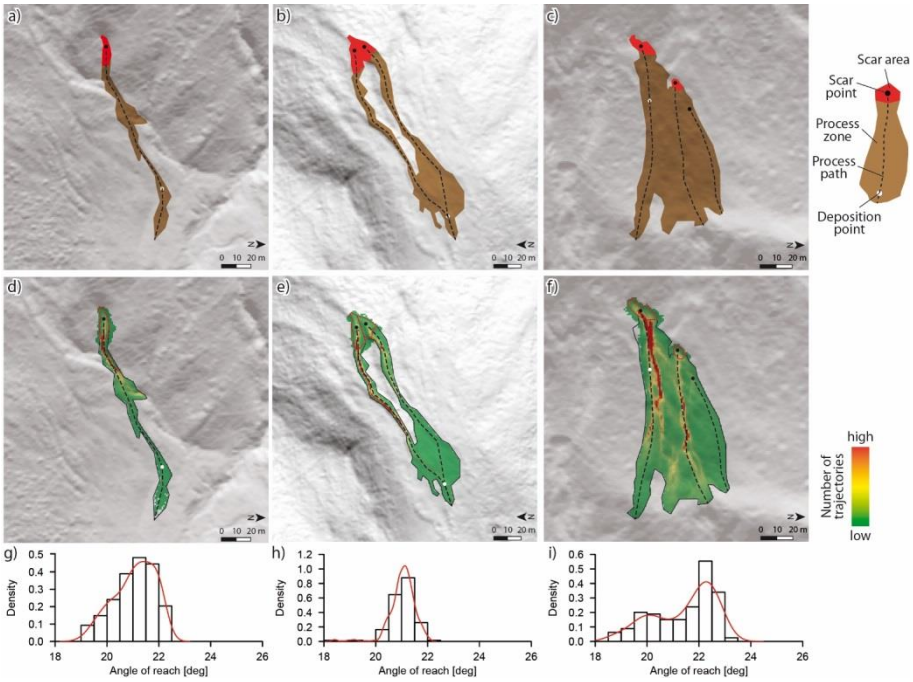

Abb. 21: Kalibrierung des Pauschalgefälles für drei ausgewählte flachgründige Rutschungen. Lediglich vollständig kartierte Rutschungen (a-c; n=48) wurden für die Rückrechnung (d-f) der Verteilungen des Pauschalgefälles (g-i) verwendet.

Die Analyse der Großwetterlage vor und während dieser Ereignisse zeigte, dass jeweils ein abgetropftes Höhentief („cut-off low“) in Verbindung mit der orographischer Hebung der anströmenden Luftmassen verantwortlich für die hohen Niederschlagsmengen war (Abb. 22). Den Ergebnissen des EU-Projekts ACQWA zufolge können abgetropfte Höhentiefs in globalen (GCMs) und regionalen (RCMs) Klimamodellen nur unzureichend abgebildet werden (Awan und Formayer, 2016). Bis zum Ende das 21. Jahrhunderts prognostizieren die aktuellste Generation regionaler Klimamodelle einen Anstieg des 99,9. Perzentils des Tagesniederschlags um 10% bis 40%, bedingt durch den erhöhten Wasserdampfgehalt der wärmeren Luft (Abb. 23).

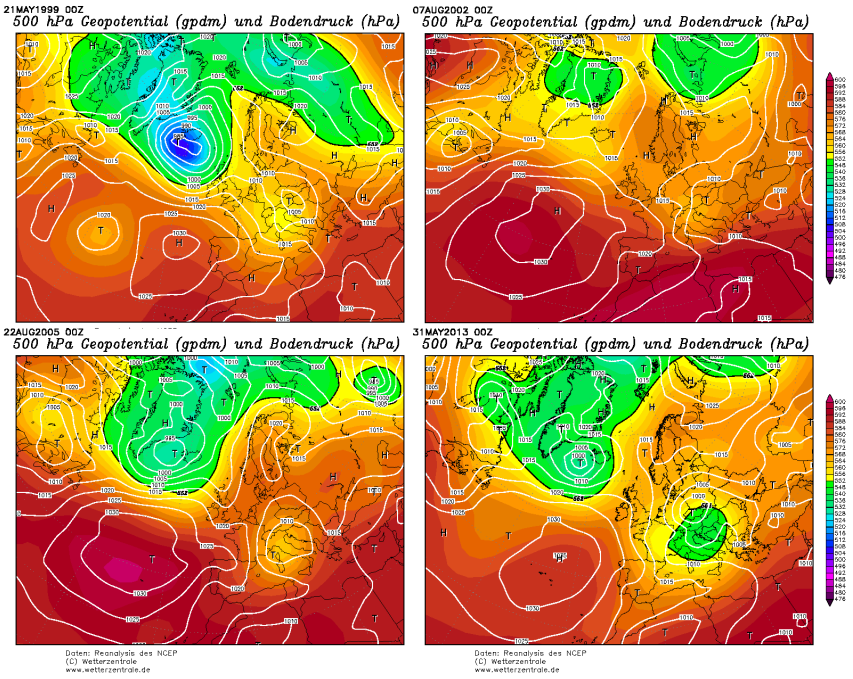

Abb. 22: Großwetterlagen während der rutschungsauslösenden Niederschlagsereignisse im Mai 1999, August 2002, August 2005 und Juni 2013.

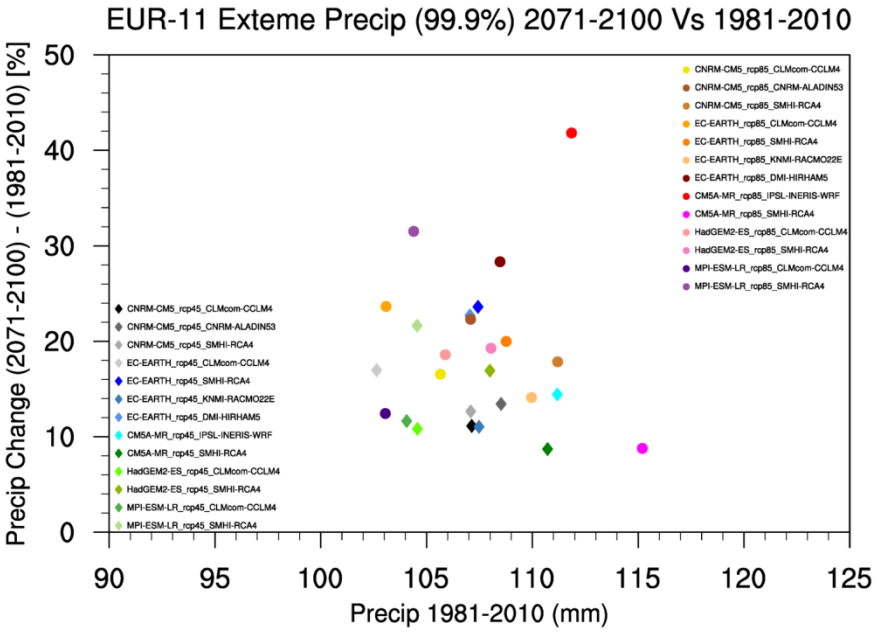

Abb. 23: Relative Veränderung des 99,9. Perzentil des Tagesniederschlags (2071 - 2100) aufgetragen gegen das 99,9. Perzentil des aktuellen Tagesniederschlags (1981 - 2010) basierend auf verschiedenen RCMs (RCP 4.5 und RCP 8.5).

Für insgesamt fünf Niederschlagsereignisse, die zahlreiche flachgründige Rutschungen auslösten, wurden stündliche Niederschlagskarten für ganz Vorarlberg aufbereitet. Als Datengrundlage dienten die stündlichen Zeitreihen aller meteorologischen Stationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik (ZAMG) und des Hydrographischen Dienstes Vorarlbergs (HD). Die aufbereiteten Daten umfassen folgende auslösende Niederschlagsereignisse:

- 21./22. Mai 1999
- 11./12. August 2002
- 22./23. August 2005
- 27. Juli 2010
- 1./2. Juni 2013

Für diese Ereignisse wurden an den jeweils im Inventar der Stufe A enthaltenen Rutschungen Dauer und Niederschlagsintensität ausgewertet (Abb. 24). Ein Niederschlagsereignis wurde dabei über einen minimalen stündlichen Niederschlag von 0,1 mm und einer Mindestdauer von sechs Stunden definiert. Der resultierende Zusammenhang aus Intensität und Dauer (I-D-Diagramm) ist in Abb. 24 dargestellt und mit bestehenden Untergrenzen der Intensitäts-Dauer-Beziehung aus der Literatur verglichen. Generell stimmt der von Moser und Hohensinn (1983) für Teile Kärntens publizierte Zusammenhang am besten mit den Daten aus Vorarlberg überein.

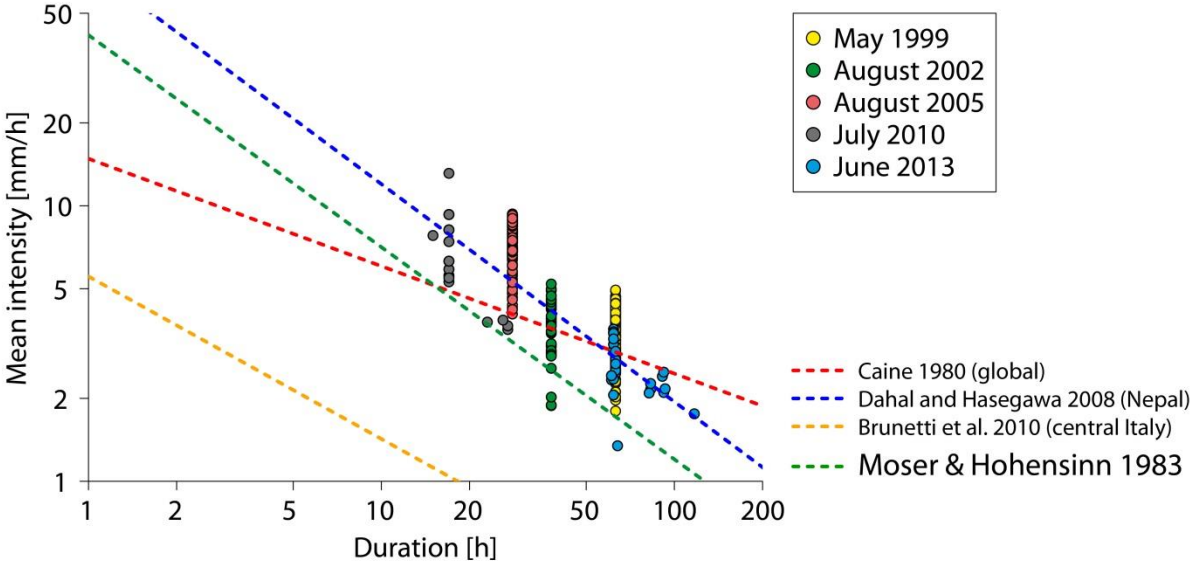

Abb. 24: Zusammenhang von Intensität und Dauer der auslösenden Niederschlagsereignisse.

Auswirkungen veränderter Niederschlagsintensitäten

Gegenwärtige Niederschlagsbedingungen

Basierend auf dem rutschungsauslösenden Niederschlagsereignis vom 22./23. August 2005, setzt sich die aktuelle potenzielle Gefährdung durch flachgründige Rutschungen aus jenen Flächen zusammen, die als Anbruchflächen vorhergesagt wurden (landslide susceptibility) und jenen der ausgeschiedenen Auslaufbereiche (impact susceptibility). Basierend auf den Ergebnissen des Modellensembles und der Vorwärtsmodellierung mit dem empirischen Auslaufmodell, wurde eine qualitative Karte der Gefährdung durch flachgründige Rutschungen für die drei Untersuchungsgebiete erstellt (Abb. 25).

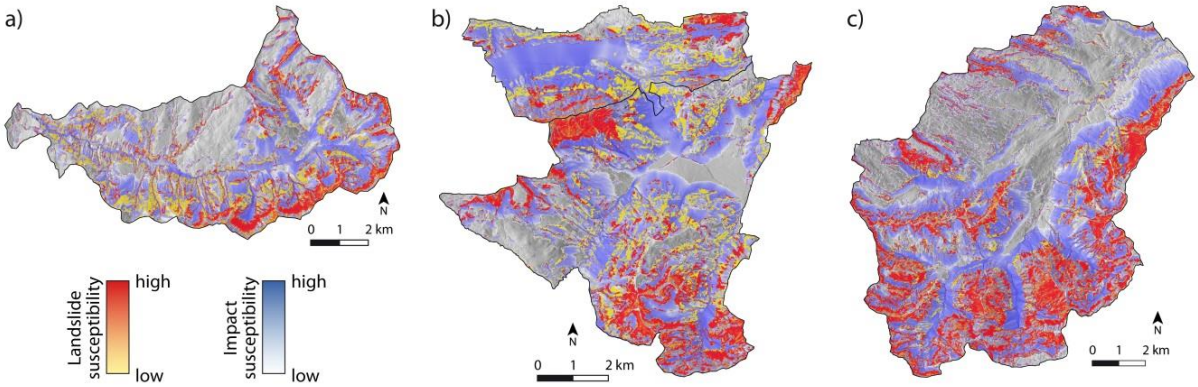

Abb. 25: Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen und Wirkung innerhalb des Auslaufbereichs in den Untersuchungsgebieten Laternsertal (a), Au/Schnepfau (b) und Kleinwalsertal (c) für das auslösende Niederschlagsereignis vom 22./23. August 2005.

Nach Varnes (1984) ist das Risiko *R* definiert als das Produkt aus der Gefahr *H*, dem Schadenswert *E* und der Verwundbarkeit *V*. Risikokarten sind folglich das Resultat einer Kombination von Gefahrenkarten mit Karten potenzieller Schäden unter Berücksichtigung der Verwundbarkeit (Remondo et al. 2008). Als Datengrundlage wurde für das Laternsertal eine Landbedeckungskarte aus der hochauflösenden Orthophotoserie von 2006 (0,25x0,25 m) mittels objekt-basierter Bildklassifizierung erstellt (Kamps et al. 2016). Dabei wurden die Klassen Wald, Wiese/Weide, Vegetationslose/Bebaute Fläche und Schatten berücksichtigt. Nachträglich wurden Gebäude (OSM 2016) und die Landstraße L51 (VOGIS 2016) als eigene Klassen hinzugefügt. Anschließend wurden nach dem Ansatz von Remondo et al. (2008) eine Verwundbarkeits- und Risikokarte erstellt (Abb. 26). Die Verwundbarkeit *V* ist dabei ausgedrückt als potenzielle Verluste *L* dividiert durch den Einheitswert der jeweiligen Klasse *E*.

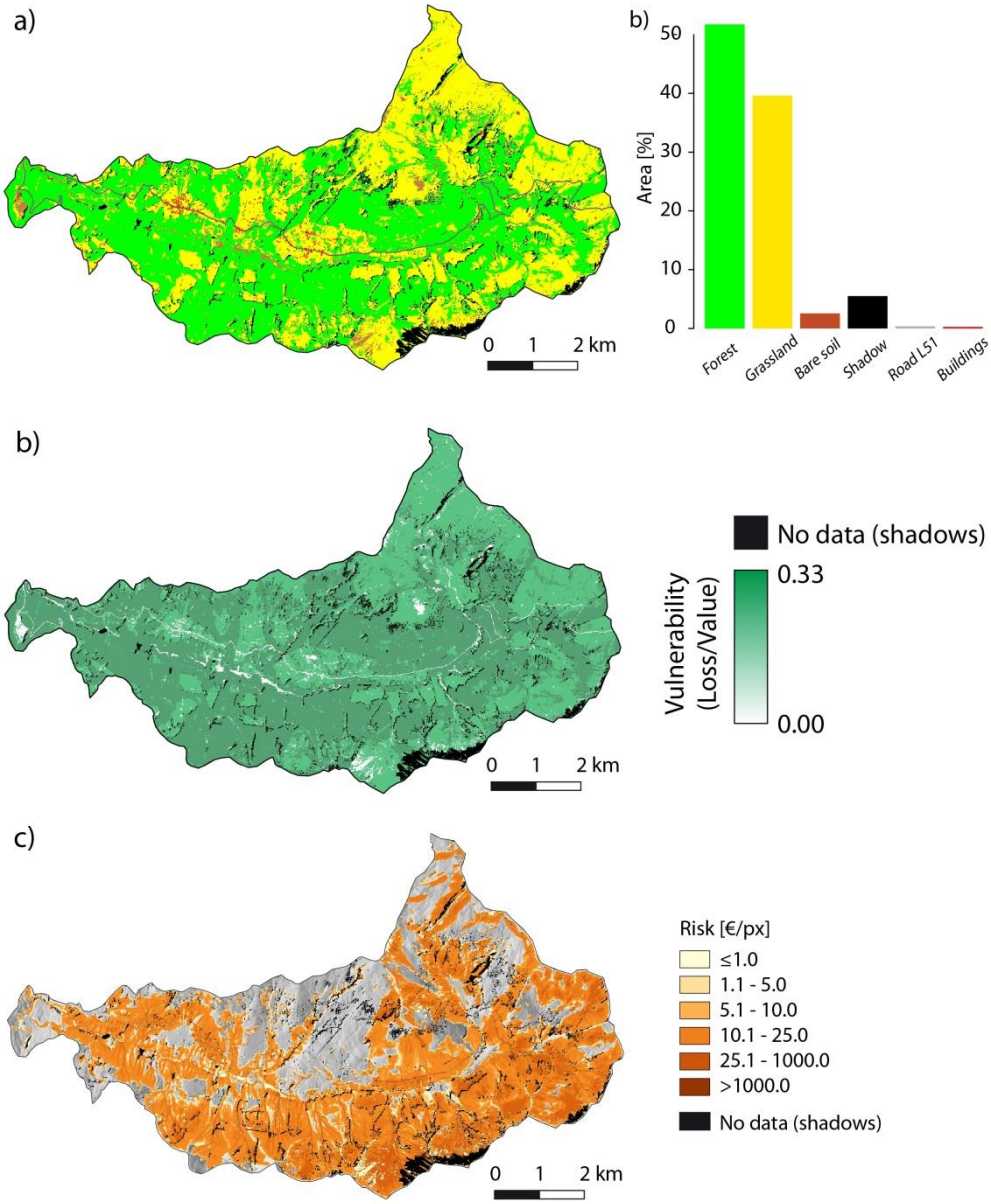

Abb. 26: Landbedeckungskarte (a), Verwundbarkeitskarte (b) und Risikokarte (c) für das Laternsertal.

Veränderte Niederschlagsbedingungen

Auch für die mit einer um 25% erhöhten Niederschlagsintensität abgeleiteten Anbruchflächen wurden die Auslaufgebiete mit dem empirischen Auslaufmodell bestimmt. Sowohl die Flächen der Anbruch- als auch der Auslaufgebiete nehmen dabei leicht zu (Abb. 27a). Unter der Annahme, dass es keine Änderung des Schadenspotenzials und der Schadensanfälligkeit gibt, wurde mit der resultierenden Gefahrenkarte eine Risikokarte (Abb. 27b) erzeugt. Im Vergleich zur Risikokarte unter gegenwärtigen Niederschlagsbedingungen, nimmt das Risiko bei einer berücksichtigten Zunahme der Niederschlagsintensität um 25% leicht zu (Abb. 27c).

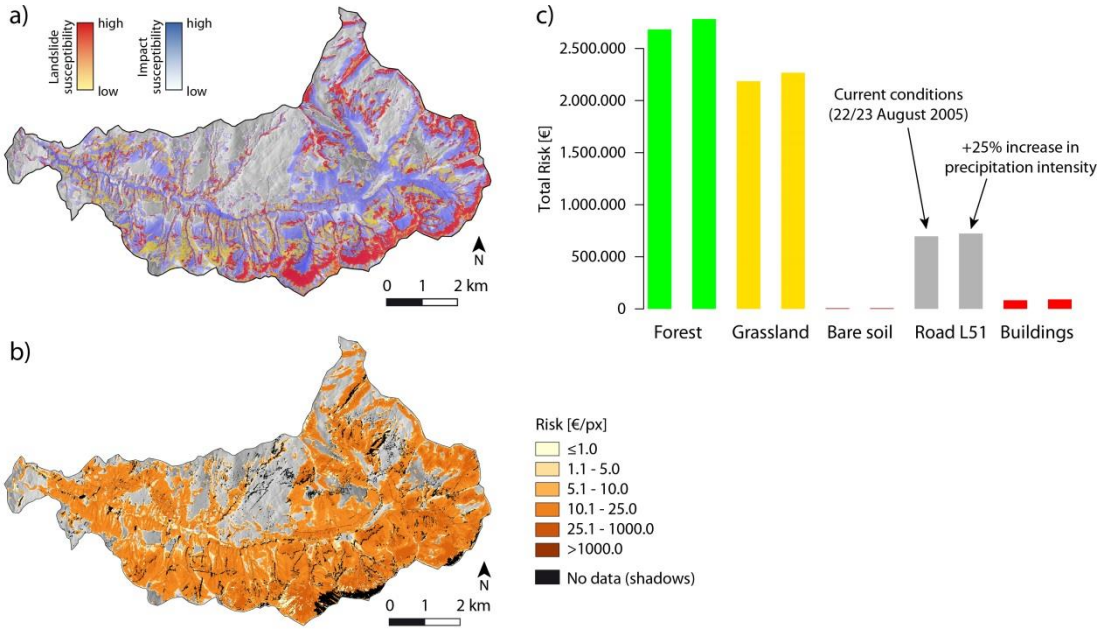

Abb. 27: Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen und Wirkung innerhalb des Auslaufbereichs (a) und die resultierende Risikokarte für das Laternsertal (b) mit einer um 25% erhöhten Niederschlagsintensität für das Niederschlagsereignis vom 22./23. August 2005. Das Balkendiagramm (c) zeigt das totale Risiko pro Landbedeckungsklasse für akutelle Bedingungen und unter Berücksichtigung eines Anstiegs der Niederschlagsintensität um 25%.

Während die Auswirkungen der ansteigenden Niederschlagsintensität nur geringe Auswirkungen auf die Hangstabilität nach sich zieht (Abb. 28b), steigt der Oberflächenabfluss dem Modellensemble zufolge stärker an (Abb. 28c). Obwohl beide Trends nicht signifikant sind, könnte dieses Ergebnis darauf hinweisen, dass die Niederschlagsintensität gegenwärtiger rutschungsauslösender Ereignisse bereits nahe an oder bereits über der Infiltrationskapazität der Böden liegt. Eine generelle Zunahme der Niederschlagsintensität würde jedoch dazu führen, dass Niederschlagsereignisse die bis dato noch keine flachgründigen Rutschungen auslösten, zukünftig potenziell auslösende Ereignisse darstellen könnten.

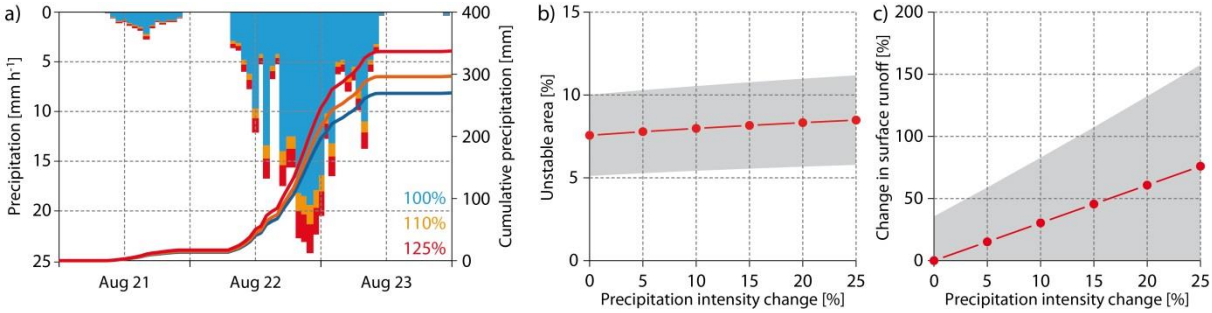

Abb. 28: Erhöhung der Niederschlagsintensität für das Niederschlagsereignis vom 22./23. August 2005 (a) und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Hangstabilität (b) und den Oberflächenabfluss (c). Der graue Bereich in (b) und (c) zeigt die Unsicherheit des Modellensembles.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Rutschungsinventar

Für die Modellierung flachgründiger Rutschungen ist zunächst ein detailliertes Rutschungsinventar notwendig. Während der Kartierung auf Basis der neun verfügbaren Orthophotos wurden weitaus mehr Rutschungen entdeckt als zunächst angenommen. Es zeigte sich auch, flachgründige Rutschungen in digitalen Geländemodellen vor allem unter Wald oftmals nicht eindeutig identifiziert werden können. Daher wurde stets ein Nachweis in einer der Orthophotoserien vorausgesetzt.

Für die statistische Modellierung der Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen ist die Kartierung in Fernerkundungsdaten ausreichend. Für die Anwendung statistischer Modelle sind eine ausreichende Anzahl an exakt verorteten Anbruchflächen flachgründiger Rutschungen. Für die Anwendung (dynamischer) physikalisch-basierter Modelle müssen die für die Validierung verwendeten flachgründigen Rutschungen zudem datiert sein und dem berücksichtigten Niederschlagsereignis zugeordnet werden können.

Das erstellte Rutschungsinventar stellt eine ideale Datengrundlage für die Anwendung statistischer Modelle und physikalisch-basierter Modelle (für die Ereignisse vom Mai 1999 und August 2005) dar. Mit der Kartierung des Auslaufes können darüber hinaus Auslaufmodelle kalibriert werden. Das Datenmodell des Inventars wurde dabei für bestehende Standards der Dokumentation von Naturgefahrenprozessen optimiert. Die meisten der kartierten Rutschungen konnten nur durch die sofortige Aufnahmen im Gelände (Andrecs et al. 2002, Markart et al. 2007) einem Niederschlagsereignis zugeordnet werden. Geländeerhebungen im unmittelbaren Anschluss an rutschungsauslösende Niederschlagsereignisse sind für die Kalibrierung und Validierung physikalisch-basierter Modelle daher von hohem Wert. Die exakte Verortung datierter Rutschungen aus bestehenden Archiven ist dagegen in den meisten Fällen nicht möglich und daher nicht effektiv. Generell wäre es notwendig, einheitliche Standards für die Erstellung von Rutschungsinventaren auf nationaler oder Länderebene einzuführen.

Modellierung

Es konnte gezeigt werden, dass das physikalisch-basierte Hangstabilitätsmodell TRIGRS 2.0 in der Lage ist, die relevanten Prozesse (Infiltration, Hangversagen) auf einem geeigneten Maßstab abzubilden. Trotz der im Modell berücksichtigten Vereinfachungen und Annahmen können Ort und Auslösezeitpunkt der meisten kartierten flachgründigen Rutschungen nachvollzogen werden. Mit dem kalibrierten Modellensemble konnten 73,0% der beobachteten Rutschungen vom August 2005 und 91,5% der beobachteten Rutschungen vom Mai 1999 korrekt vorhergesagt werden.

Dennoch können 27,0% (August 2005) und 8,5% (Mai 1999) nicht mit dem Modellensemble vorhergesagt werden. Dieses Unvermögen ist vermutlich der vereinfachten Abbildung der relevanten Prozesse geschuldet (z.B. eindimensionale vertikale Infiltration, kein Zwischenabfluss, keine Berücksichtigung präferenzieller Fließwege). Das Modell könnte weiter verbessert werden, wobei dadurch zusätzliche Parameter notwendig würden. Damit nimmt auch die Unsicherheit der Modellergebnisse zu.

Das Modellensemble, welches im Laternsertal identifiziert wurde, konnte erfolgreich auf die beiden anderen Untersuchungsgebiete Au/Schnepfau und das Kleinwalsertal übertragen werden. Die Vorhersagerate für Ort und Zeit beobachteter Rutschungen war sogar geringfügig besser als im Laternsertal. Demnach können physikalisch-basierte Modelle mit ausreichend kalibrierten Parameterwerten gut in andere Gebiete übertragen werden. Allerdings sollten Ziel- und Ursprungsgebiet ähnliche Materialeigenschaften aufweisen.

Bei der Interpretation der Modellergebnisse müssen jedoch Schwachstellen des angewendeten Modells berücksichtigt werden. Das mobilisierte Material flachgründiger Rutschungen wird hangabwärts verlagert. Reicht der Rutschkörper bis zum Anstehenden hinunter, kann es an exakt derselben Stelle erst nach neuerlicher Ablagerung von Lockermaterial zu erneutem Hangversagen kommen. Dieses Verhalten ist in dem angewendeten Modell TRIGRS 2.0 momentan nicht implementiert. Eine Lösungsmöglichkeit wäre, das Regolithmächtigkeitsmodell entsprechend anzupassen, nachdem flachgründige Rutschungen vom Modell vorhergesagt wurden. Eine Komplikation ergibt sich allerdings dadurch, dass Anbruchflächen flachgründiger Rutschungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen des Öfteren repariert werden, um ihre Nutzung wieder zu gewährleisten. In einigen Fällen kann dies mit Hilfe der Datenbank der Agrarbezirksbehörde rekonstruiert werden (siehe Seite 8f). Diese Fläche könnte theoretisch im Anschluss erneut versagen. Daher müsste der Zustand der Anbruchflächen im Inventar und im Regolithmächtigkeitsmodell nachverfolgt bzw. angepasst werden. Diese Schwachstellen der Modellierung bedürfen weiterer Untersuchungen.

Mögliche Auswirkungen

Die Ergebnisse des Modellensembles mit erhöhter Niederschlagsintensität zeigen einen geringen Anstieg der potenziell instabilen Flächen. Gleichzeitig steigt der Oberflächenabfluss markant an. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Niederschlagsintensität während gegenwärtiger rutschungsauslösender Ereignisse bereits nahe an oder über der Infiltrationskapazität der Böden ist. Ein weiterer Anstieg der Niederschlagsintensität hätte demnach in erster Linie einen Anstieg des Oberflächenabflusses zur Folge.

Ein genereller Anstieg der Niederschlagsintensität könnte darüber hinaus jedoch zur Folge haben, dass Niederschlagsereignisse, die bislang keine flachgründigen Rutschungen auslösten, unter zukünftigen Klimabedingungen zu auslösenden Ereignissen werden (ausreichende Intensität/Dauer). Es könnten demnach während eines Niederschlagsereignisses nicht bedeutend mehr Rutschungen ausgelöst werden - vielmehr würden auslösende Ereignisse häufiger auftreten (Abb. 29). Diese Entwicklung müsste jedoch noch in weiteren Studien eingehend untersucht und belegt werden. Die im Projekt C3S-ISLS generierten Daten und erarbeiteten Methoden können als solide Grundlage für weiterführende Untersuchungen herangezogen werden.

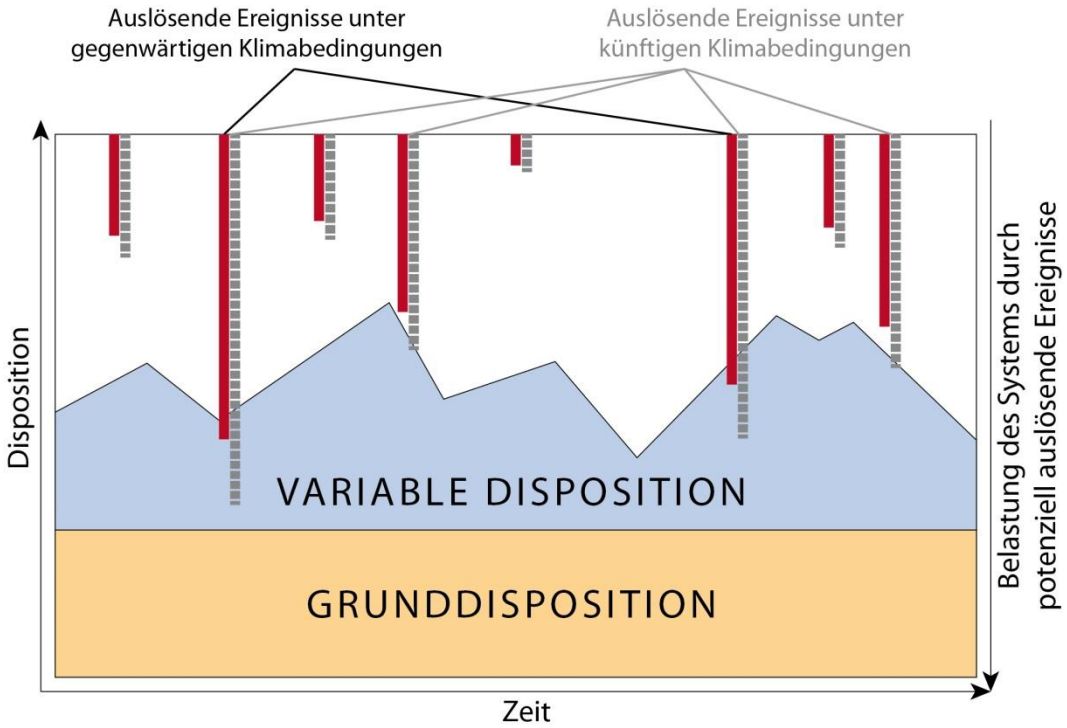

Abb. 29: Konzept der Auswirkungen eines generellen Anstiegs der Niederschlagsintensität (verändert nach Zimmermann 1997).

Zitierte Literatur

Amann, G.; Schennach, R.; Kessler, J.; Maier, B. & Terzer, S. 2014: Handbuch der Vorarlberger Waldgesellschaften, Vol. 2, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Forstwesen.

Andrecs, P.; Markart, G.; Lang, E.; Hagen, K.; Kohl, B. & Bauer, W. 2002: Untersuchung der Rutschungsprozesse vom Mai 1999 im Laternsertal (Vorarlberg), BFW Berichte 127, 55-87.

Auer, I.; Böhm, R.; Jurkovic, A.; Lipa, W.; Orlik, A.; Potzmann, R.; Schöner, W.; Ungersböck, M.; Matulla, C.; Briffa, K.; Jones, P.; Efthymiadis, D.; Brunetti, M.; Nanni, T.; Maugeri, M.; Mercalli, L.; Mestre, O.; Moisselin, J. M.; Begert, M.; Müller-Westermeier, G.; Kveton, V.; Bochnicek, O.; Stastny, P.; Lapin, M.; Szalai, S.; Szentimrey, T.; Cegnar, T.; Dolinar, M.; Gajic-Capka, M.; Zaninovic, K.; Majstorovic, Z. & Nieplova, E. 2007: HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region, International Journal of Climatology 27(1), 17-46.

Awan, N. K.; Formayer, H., 2016: Cutoff low systems and their relevance to large-scale precipitation in the European Alps. Theoretical and Applied Climatology, 1-10.

Bäk, R.; Braunstingl, R.; Hagen, K.; Kociu, A.; Kolmer, C.; Melzner, S.; Mölk, M.; Preh, A. & Schwarz, L. 2015: Materialien und Arbeitspapiere - Arbeitsgruppe Geologie. In: Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung (ÖROK-Schriftenreihe Nr. 193), pp. 155-195.

Baum, R. L.; Godt, J. W. & Savage, W. Z. 2010: Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration, Journal of Geophysical Research 115, F03013.

Baum, R. L.; Savage, W. Z. & Godt, J. W. 2008: TRIGRS- A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0, Technical report, U.S. Geological Survey.

Bischetti, G.; Chiaradia, E.; Epis, T. & Morlotti, E. 2009: Root cohesion of forest species in the Italian Alps, Plant and Soil 324(1-2), 71-89.

Bischetti, G. B.; Chiaradia, E. A.; Simonato, T.; Speziali, B.; Vitali, B.; Vullo, P. & Zocco, A. 2005: Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy), Plant and Soil 278(1-2), 11-22.

Brunetti, M. T.; Peruccacci, S.; Rossi, M.; Luciani, S.; Valigi, D. & Guzzetti, F. 2010: Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy, Natural Hazards and Earth System Sciences 10(3), 447-458.

Caine, N. 1980: The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows, Geografiska Annaler Series A-physical Geography 62(1-2), 23-27.

Cruden, D. M. & Varnes 1996: Landslide types and processes. In: D. J.Turner, A. & Schuster, R., Landslides: investigation and mitigation, National Academies Press, pp. 36-75.

Czurda, K.; Schneider, U. & Vigl, E. 2000: Zusammenstellung und Aufnahme der Rutsch- und Murereignisse in Vorarlberg der Jahre 1999 und 2000, Jahrbuch des Vorarlberger Landesmuseumsverein, Bregenz., 81-101.

Dahal, R. K. & Hasegawa, S. 2008: Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya , Geomorphology 100(3/4), 429-443.

Guzzetti, F.; Mondini, A. C.; Cardinali, M.; Fiorucci, F.; Santangelo, M. & Chang, K.-T. 2012: Landslide inventory maps: New tools for an old problem, Earth-Science Reviews 112(1/2), 42-66.

Heim, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben, Fretz & Wasmuth, Zürich.

Hiebl, J; Frei C., 2016: Daily precipitation grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. Theoretical and Applied Climatology 124, 161-178.

Hübl, J.; Kienholz, H. & Loipersberger, A. 2002: DOMODIS-Documentation of mountain disasters, State of discussion in the European mountain areas, Interpraevent, Schriftenreihe 1.

Kamps, M.; Seijmonsbergen, A.C.; Rutzinger, M. & Zieher T. 2016: Assessment of the interaction of land-cover change on shallow landslide occurrence: an automated object-based approach. In: Proceedings of the GEOBIA 2016: Solutions and Synergies, 14 – 16 September 2016, Enschede, The Netherlands.

Kim, D.; Im, S.; Lee, C. & Woo, C. 2013: Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed, Ecological Engineering 61, Part C, 658-668.

Kutschera, L. & Lichtenegger, E. 2002: Wurzelatlas europäischer Waldbäume. Leopold Stocker Verlag, Graz.

Lateltin, O.; Haemmig, C.; Raetzo, H. & Bonnard, C. 2005: Landslide risk management in Switzerland, Landslides 2(4), 313-320.

Markart, G.; Perzl, F.; Kohl, B.; Luzian, R.; Kleemayr, K.; Ess, B. & Mayerl, J. 2007: Schadereignisse 22./23. August 2005 - Ereignisdokumentation und -analyse in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. BFW-Dokumentation, Bundesforschungs-und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.

Mergili, M.; Krenn, J. & Chu, H.-J. 2015: r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing, Geoscientific Model Development 8(12), 4027-4043.

Moser, M. & Hohensinn, F. 1983: Geotechnical Aspects of Soil Slips In Alpine Regions, Engineering Geology 19(3), 185-211.

ÖNORM EN ISO 22476-2:2012: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen, Austrian Standards Institute.

OSM 2016: Open Street Map. https://www.openstreetmap.org (aufgerufen am 10. August 2016)

Park, D. W.; Nikhil, N. V. & Lee, S. R. 2013: Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions 1(3), 2547-2587.

Prinz, H. & Strauß, R. 2011: Ingenieurgeologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Remondo, J.; Bonachea, J. & Cendrero, A. 2008: Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences, Geomorphology 94(3/4), 496-507.

Rowe, P. W. & Barden, L. 1966: A new consolidation cell, Geotechnique 16(2), 162-170.

Salciarini, D.; Godt, J. W.; Savage, W. Z.; Conversini, P.; Baum, R. L. & Michael, J. A. 2006: Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy, Landslides 3(3), 181-194.

Scheidegger, A. E. 1973: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, Rock mechanics 5(4), 231-236.

Schmidt, K. M.; Roering, J. J.; Stock, J. D.; Dietrich, W. E.; Montgomery, D. R. & Schaub, T. 2001: The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range, Canadian Geotechnical Journal 38(5), 995-1024.

Schweigl, J. & Hervás, J. 2009: Landslide mapping in Austria, Technical report, JRC Scientific and Technical Reports EUR 23785 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 61.

Seijmonsbergen, A. 1992: Geomorphological evolution of an alpine area and its application to geotechnical and natural hazard appraisal in the NW. Rätikon mountains and S. Walgau (Vorarlberg, Austria), PhD thesis, University of Amsterdam.

Steinacher, R.; Medicus, G.; Fellin, W. & Zangerl, C. 2009: The Influence of Deforestation on Slope (in-) Stability, Austrian Journal of Earth Sciences 102(2), 90-99.

Trigila, A.; Iadanza, C. & Spizzichino, D. 2010: Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing, Landslides 7(4), 455-470.

USGS 2016: TRIGRS 2.0. https://pubs.usgs.gov/of/2008/1159/ (aufgerufen am 2. November 2016).

Vieira, B. C.; Fernandes, N. F. & Filho, O. A. 2010: Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil, Natural Hazards and Earth System Sciences 10(9), 1829-1837.

VOGIS 2016: WebGIS Vorarlberg (Vorarlberg Atlas). http://vogis.cnv.at/geodaten/ (aufgerufen am 22. August 2016)

Werner, R. & Auer, I. 2001a: Klima von Vorarlberg: Eine anwendungsorientierte Klimatographie. 1. Lufttemperatur, Bodentemperatur, Wassertemperatur, Luftfeuchte, Bewölkung, Nebel. Bregenz: Amt der Vorarlberger Landesregierung., Umweltinstitut des Landes Vorarlberg, Bregenz.

Werner, R. & Auer, I. 2001b: Klima von Vorarlberg: Eine anwendungsorientierte Klimatographie. 2. Niederschlag und Gewitter, Schnee und Gletscher, Verdunstung, Luftdruck, Wind. Bregenz: Amt der Vorarlberger Landesregierung., Umweltinstitut des Landes Vorarlberg, Bregenz.

Wirth, H. 2004: Naturereignisdokumentation 1999 und 2000, Vorarlberger Landesregierung.

Zieher, T.; Perzl, F.; Rössel, M.; Rutzinger, M.; Meißl, G.; Markart, G. & Geitner, C. 2016a: A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility - Two test cases in Vorarlberg, Austria, Geomorphology 259, 40 - 54.

Zieher, T.; Perzl, F.; Gruber, F.; Rutzinger, M.; Meißl, G. & Geitner, C. 2016b: Data requirements for the assessment of shallow landslide susceptibility using logistic regression. Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice, CRC Press, pp. 2139-2146.

Zieher, T.; Markart, G.; Ottowitz, D.; Römer, A.; Rutzinger, M.; Meißl, G. & Geitner, C. 2017a: Water content dynamics at plot scale–comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling, Journal of Hydrology 544, 195-209.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Schneider-Muntau, B.; Perzl, F.; Leidinger, D.; Formayer, H. & Geitner, C. 2017b: Sensitivity analysis and calibration of a dynamic physically-based slope stability model, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions 2017, 1-31.

Zimmermann, M. 1997: Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag Zürich.

Zizioli, D.; Meisina, C.; Valentino, R. & Montrasio, L. 2013: Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy, Natural Hazards and Earth System Science 13(3), 559-573.

C) Projektdetails

6 Methodik

Rutschungsinventar

Als Datengrundlage für alle weiteren Schritte wurde ein umfangreiches Rutschungsinventar auf Basis von Fernerkundungsdaten, Geländeerhebungen und bestehenden Archivdaten für die Untersuchungsgebiete Laternsertal, Au/Schnepfau und Kleinwalsertal erstellt. Folgende Arbeitsschritte wurden dabei durchgeführt:

- Entwurf eines geeigneten Datenmodells
- Systematische Interpretation von neun Orthophotoserien und Ableitungen aus zwei ALS-Kampagnen
- Integration bestehender Archivdokumente

Dabei wurde eine Kombination verschiedener Methoden angewendet, um ein möglichst vollständiges Inventar mit exakt verorteten als auch datierten Rutschungen aufbauen zu können. Neben der Auswertung von Fernerkundungsdaten wurde versucht, Dokumentationen flachgründiger Rutschungen aus bestehenden Archiven zu verorten. Dies gestaltete sich jedoch schwierig, da Meldungen von flachgründigen Rutschungen in der Regel nur eine ungefähre Lage beinhalten, die in Fernerkungdungsdaten meist nicht nachvollzogen werden kann. Dagegen konnte fast allen der nach den Niederschlagsereignissen im Mai 1999 (Andrecs et al. 2002) und August 2005 (Markart et al. 2005) im Gelände aufgenommenen Rutschungen ihre Entsprechung in den Fernerkundungsdaten zugeordnet werden. Diese aufgenommenen Rutschungen stellen auch einen Großteil der Einträge im Rutschungsinventar dar, die sowohl verortet als auch datiert sind. Insgesamt wurden 2379 flachgründige Rutschungen kartiert und aufgenommen. Exemplarisch sind in Abb. 30 die kartierten flachgründigen Rutschungen je Orthophotoserie für das Laternsertal und das Kleinwalsertal dargestellt.

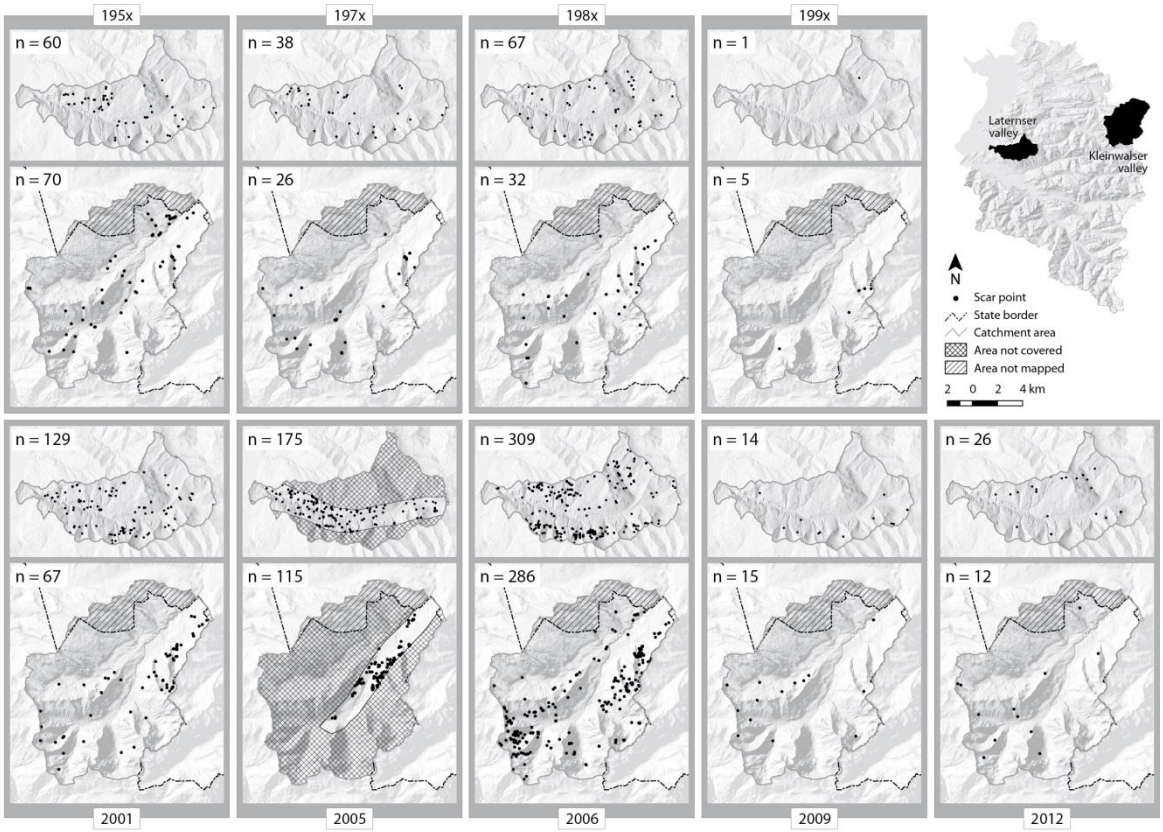

Abb. 30: Kartierte flachgründige Rutschungen in den einzelnen Orthophotoserien. Die Aufnahme der Orthophotoserie von 2005 beschränkte sich auf den Bereich der Hauptflüsse (Zieher et al. 2016a).

Parameterbestimmung und Feldexperiment

Für die Anwendung des physikalisch-basierten Modells TRIGRS 2.0 sind zahlreiche Eingangsparameter notwendig. Um das Modell ausreichend parametrisieren zu können, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Entnahme geotechnischer Proben an acht bestehenden Rutschungsanrissen
- Durchführung entsprechender geotechnischer Labortests
- Durchführung von Rammsondierungen
- Beregnungsversuch

Zunächst wurde anhand eines Feldexperiments getestet, ob das gewählte Modell TRIGRS 2.0 in der Lage ist, die relevanten Prozesse abzubilden. Dazu wurde ein Beregnungsversuch auf einer Fläche von 100 m² durchgeführt. Die Infiltration des aufgebrachten Niederschlags wurde mit Hilfe eines Geoelektrikprofils verfolgt. Die Ergebnisse wurden anschließend mit dem Modell nachvollzogen.

Im Rahmen des Projekts C3S-ISLS wurden im Laternsertal geotechnische Proben an acht Rutschungsanrissen geworben. Anhand dieser Proben wurden die Wertebereiche der notwendigen geotechnischen und hydrologischen Parameter anhand der entsprechenden Laborversuche (Scherversuche, Ödometerversuche, Korngrößenverteilung, Dichtebestimmung) abgeleitet. Zudem wurden Rammsondierungen entlang von ausgewählten Hangtransekten durchgeführt, um die Mächtigkeit des Lockermaterials abzuschätzen. Die räumliche Variabilität der eingehenden Parameter kann mit heutigen Methoden für ganze Einzugsgebiete (Größenordnung 50 km²) nicht, oder nur unzureichend erfasst werden. Eine Möglichkeit ist es, auf Basis verfügbarer Karten, die Einflüsse auf die Materialeigenschaften beschreiben (z.B. geologische oder geomorphologische Karten) Gebiete homogener Materialcharakteristika – in sogenannten geotechnischen Karten (z.B. Seijmonsbergen 1992) – zusammenzufassen. Diese Karten stellen anschließend die Datengrundlage für die physikalisch-basierte Modellierung dar. Da die Erstellung geotechnischer Karten expertenbasiert und damit subjektiv erfolgt, wurde ein anderer Ansatz gewählt.

Modellkalibrierung und -validierung

Abb. 31 zeigt die Arbeitsschritte der Modellkalibrierung und –validierung. Alle Parameter – mit Ausnahme der Vegetationsparameter, die nur innerhalb der bewaldeten Flächen in das Modell eingingen – wurden als räumlich konstant angenommen. Vier sensitive Parameter, die das Modellergebnis entscheidend beeinflussen, wurden mittels Sensitivitätsanalyse identifiziert.

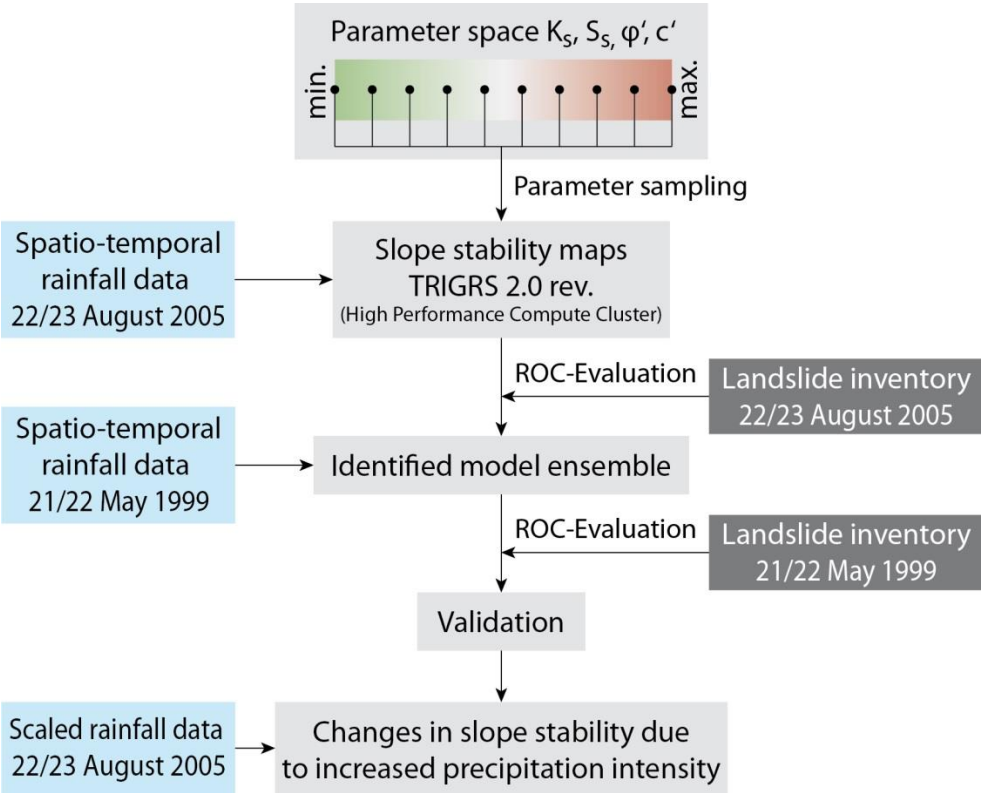

Abb. 31: Arbeitsschritte der Modellkalibrierung und –validierung (Zieher et al. 2017b).

Die in das Modell eingehenden Werte dieser Parameter wurden systematisch variiert und alle resultierenden 10000 Kombinationen mit Hilfe eines Hochleistungsrechners getestet. Aus diesen 10000 Simulationen wurden jene 25 selektiert, die die meisten Rutschungen, die am 22./23. August 2005 ausgelöst wurden, zeitlich korrekt vorhersagten. Dieses Modellensemble wurde anschließend anhand der am 21./22. Mai 1999 ausgelösten flachgründigen Rutschungen validiert. Es konnte gezeigt werden, dass obwohl sich der zeitliche Verlauf der beiden Niederschlagsereignisse unterscheidet, ein Großteil der ausgelösten Rutschungen korrekt vorhergesagt wurde. Das Ensemble lieferte darüber hinaus auch in den anderen beiden Untersuchungsgebieten gute Ergebnisse.

Mögliche Auswirkungen erhöhter Niederschlagsintensitäten

Das Modellensemble wurde anschließend mit erhöhten Niederschlagsintensitäten angetrieben. Dazu wurde das Niederschlagsereignis vom 22./23. August 2005 um bis zu 125% skaliert. Dadurch erhöht sich die potenziell von flachgründigen Rutschungen betroffene Fläche leicht. Der Oberflächenabfluss nimmt dagegen markant zu. Demnach ist die Niederschlagsintensität gegenwärtiger rutschungsauslösender Niederschlagsereignisse bereits nahe an oder über der Infiltrationskapazität der Böden.

Der potenzielle Auslaufbereich flachgründiger Rutschungen unter gegenwärtigen Bedingungen und unter erhöhten Niederschlagsintensitäten wurde mit Hilfe eines empirischen Auslaufmodells abgeschätzt. Dazu wurde das Pauschalgefälle anhand von 48 vollständig kartierten flachgründigen Rutschungen im Laternsertal kalibriert und anschließend für die Vorwärtsmodellierung eingesetzt. Die resultierende Gefahrenkarte wurde mit einer Karte des Schadenpotenzials verschnitten, um Risikokarten abzuleiten. Demnach nimmt das Risiko bedingt durch flachgründige Rutschungen durch zunehmende Niederschlagsintensitäten nur geringfügig zu. Allerdings könnte sich durch die allgemeine Zunahme der Niederschlagsintensität die Häufigkeit auslösender Ereignisse erhöhen.

7 Arbeits- und Zeitplan

In Abb. 32 und Abb. 33 sind die Abfolge der Workpackages sowie deren Zeitplan. Mit der kostenneutralen Verlängerung wurden die Workpackages 1 und 6 um 10 Monate verlängert.

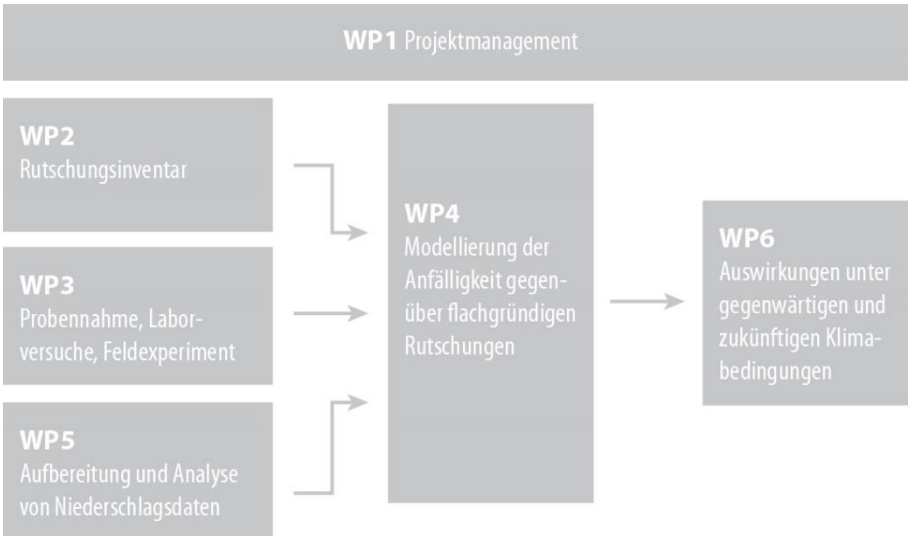

Abb. 32: Übersicht der Workpackages und deren Inhalte.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
WP 1										1.1	1.2												1.1	1.2																						1.2	1.3
WP 2			2.1			2.2		2.3													2.4																									
WP 3									3.1	3.2											3.3	3.4																								
WP 4														4.1	4.2	4.3										4.4	4.5	4.6																		
WP 5																						5.1																								
WP 6																																6.1	6.2												6.3	6.4

Abb. 33: Zeitplan der Workpackages und durchgeführten Arbeitsschritte.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Journal-Artikel

Zieher, T.; Perzl, F.; Rössel, M.; Rutzinger, M.; Meißl, G.; Markart, G. & Geitner, C. 2016a: A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility - Two test cases in Vorarlberg, Austria, Geomorphology 259, 40-54.

Zieher, T.; Markart, G.; Ottowitz, D.; Römer, A.; Rutzinger, M.; Meißl, G. & Geitner, C. 2017a: Water content dynamics at plot scale–comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling, Journal of Hydrology 544, 195-209.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Schneider-Muntau, B.; Perzl, F.; Leidinger, D.; Formayer, H. & Geitner, C. 2017b: Sensitivity analysis and calibration of a dynamic physically-basedslope stability model, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions 2017, 1-31.

Zieher, T.; Schneider-Muntau, B. & Mergili, M. (submitted): Are real-world shallow landslides reproducible by physically-based models? Four test cases in the Laternser valley, Vorarlberg (Austria). Landslides.

Präsentationen

Zieher, T. 2014: Sensitivity analysis and calibration of a coupled hydrological/slope stability model (TRIGRS), EGU General Assembly 2014, 27 April – 02 May 2014, Vienna, Austria.

Zieher, T. 2015: Prerequisites for modelling shallow landslide susceptibility – experiences from the Laternser valley, Vorarlberg. 2nd general assembly of ecorisQ, 22 April 2015, Innsbruck, Austria.

Zieher, T. 2015: Geotechnical maps as input data for physically-based modelling of shallow landslide susceptibility. 5th EUGEO Congress on the Geography of Europe, 30 August – 02 September 2015, Budapest, Hungary.

Zieher, T. 2016: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility – the C3S-ISLS Project. 17. Österreichischer Klimatag: Aktuelle Klimaforschung in Österreich, 06 – 08 April 2016, Graz, Austria.

Zieher, T. 2016: Data requirements for the assessment of shallow landslide susceptibility using logistic regression. 12th International Symposium on Landslides (ISL), 12 – 19 June 2016, Neapel, Italy.

Zieher, T. 2017: Modellierung flachgründiger Rutschungen am Beispiel des Laternsertals (Vorarlberg) – Voraussetzungen, Limitationen und Potenziale. Innsbrucker Hofburggespräche, 06.04.2017, Innsbruck, Austria.

Die Endergebnisse des Projekts C3S-ISLS wurden im Rahmen der Innsbrucker Hofburggespräche („*Beiträge von Hydrogeologie und Untergrunderkundung zur Naturgefahrenanalyse und -Prävention*“) im Congress Innsbruck vor einem fachkundigen Publikum vorgestellt.

Poster

Rutzinger, M.; Zieher, T.; Vetter, M.; Geitner, C.; Meißl, G.; Perzl, F.; Markart, G. & Formayer, H. 2013: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility - a concept. CHAT Mountain Days. 12 – 13 June 2013, Mittersill, Austria.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Vetter, M.; Geitner, C.; Meißl, G.; Perzl, F.; Markart, G. & Formayer, H. 2014: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility – the project’s research plan. 15. Österreichischer Klimatag, 02 – 04 April 2014, Innsbruck, Austria.

Zieher, T.; Rutzinger, M. & Geitner, C. 2015: Assessing the impact of input data quality on the modelling of shallow landslide susceptibility. EGU General Assembly 2015, 12 – 17 April 2015, Vienna, Austria.

Zieher, T., Meissl, G.; Rutzinger, M. & Geitner, C. 2016: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility - the C3S-ISLS Project. Jahrestagung der Österreichischen Forschungsgruppe für Geomorphologie und Umweltwandel, 23 September 2016, Innsbruck, Austria.

Kamps, M.; Seijmonsbergen; A.C.; Rutzinger, M. & Zieher T. 2016: Assessment of the interaction of land-cover change on shallow landslide occurrence: an automated object-based approach. GEOBIA, 14 – 16 September 2016, Enschede, The Netherlands.

Konferenzbeitrag (Artikel)

Zieher, T.; Perzl, F.; Gruber, F.; Rutzinger, M.; Meißl, G. & Geitner, C. 2016b: Data requirements for the assessment of shallow landslide susceptibility using logistic regression. In: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice, CRC Press, pp. 2139-2146.

Kamps, M.; Seijmonsbergen; A.C.; Rutzinger, M. & Zieher T. 2016: Assessment of the interaction of land-cover change on shallow landslide occurrence: an automated object-based approach. In: Proceedings of the GEOBIA 2016: Solutions and Synergies, 14 – 16 September 2016, Enschede, The Netherlands.

Konferenzbeitrag (Kurzfassung)

Rutzinger, M.; Zieher, T.; Vetter, M.; Geitner, C.; Meißl, G.; Perzl, F.; Markart, G. & Formayer, H. 2013: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility - a concept. In: Proceedings of the CHAT Mountain Days. 12 – 13 June 2013, Mittersill, Austria.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Vetter, M.; Geitner, C.; Meißl, G.; Perzl, F.; Markart, G. & Formayer, H. 2014: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility – the project's research plan, In: Tagungsband des 15. Österreichischen Klimatags, pp. 141. 02 – 04 April 2014, Innsbruck, Austria.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Perzl, F. & Meißl, G. 2014: Sensitivity analysis and calibration of a coupled hydrological/slope stability model (TRIGRS), In: Geophysical Research Abstracts 16, No. 8110.

Zieher, T.; Rutzinger, M. & Geitner, C. 2015: Assessing the impact of input data quality on the modelling of shallow landslide susceptibility. In: Geophysical Research Abstracts 17, No. 13005.

Zieher, T., Rutzinger, M.; Meißl, G.; Geitner, C. & Seijmonsbergen, A. 2015: Geotechnical maps as input data for physically-based modelling of shallow landslide susceptibility. Proceedings of the 5th EUGEO Congress on the Geography of Europe, 30 August – 02 September 2015, Budapest, Hungary.

Zieher, T.; Rutzinger, M.; Meißl, G.; Geitner, C.; Perzl, F.; Markart, G. & Formayer, H. 2016: Climate induced system status changes at slopes and their impact on shallow landslide susceptibility – the C3S-ISLS Project. In: Schwarzl, I.; Kolar, J.; Schöner, W.; Formayer, H.; Steininger, K.; Wolkinger, B. et al.: Tagungsband 17. Klimatag. Aktuelle Klimaforschung in Österreich, pp. 90-91. 06 – 08 April 2016. Vienna: Climate Change Centre Austria (CCCA).

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin / der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das

unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechtinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin / der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.