

Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?

Interaktive Karten zur Wirkung gegen flachgründige Rutschungen

Fachlicher Abschlussbericht: WHFF-CH Projekt 2017.19

Projektgruppe:

Frank Graf^{1,2}, Alexander Bast¹, Kevin Helzel¹, Peter Bebi

WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF; 7260 Davos Dorf

Christian Rickli

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 8903 Birmensdorf

Seppi Berwert

belop gmbh, Tulpenweg 2, 6060 Sarnen

Roland Stalder

oeko-b ag, Fronhofenstrasse 10, 6370 Stans

Begleitgruppe:

Beat Fritsche

Amt für Raum und Wald, Kt. AR, Herisau

Beat Ettlin

Amt für Wald und Energie, Kt. NW, Stans

Urs Hunziker

Amt für Wald und Landschaft, Kt. OW, Sarnen

Markus Stadler

Amt für Wald und Naturgefahren, Kt. GR, Landquart

Benjamin Lange

BAFU, Rutschungen, Lawinen und Schutzwald

Bernard Loup

BAFU, Rutschungen, Lawinen und Schutzwald

Thomas Sieber

ETHZ, Institut für integrative Biologie

«Ehemalige»:

Urs Braschler (AWE, Kt. NW), Karl Grunder (oeko-b ag)



Ausschnitt aus der interaktiven Karte für den Kanton Appenzel Ausserrhoden auf «maps.wsl.ch»

¹ Verfasser des Berichts

² Projektverantwortlicher

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Zusammenfassung.....	4
Übersicht.....	5
Bestandes-Charakterisierung (Bestandescode)	7
Bodenparameter (Geotechnik).....	8
Waldstruktur, Topographie und Bodenmechanik.....	9
Rutschungen in Abhängigkeit von Waldstruktur und Hangneigung (α)	10
Statistik (Multifaktor-Analyse, MFA)	11
Quantitative (numerische) Faktoren.....	12
Qualitative (kategoriale) Faktoren.....	14
Bodentyp.....	14
Bestandescode.....	14
Topographie	15
Fernerkundung.....	16
Hangneigung.....	16
Topographischer Feuchte-Index (TWI)	16
Vegetationshöhenmodelle (VHM).....	16
Einzelbaumdetektion	17
Entwicklungsstufe	17
Deckungsgrad.....	17
Schichtung.....	17
Mischungsgrad	18
Web-Applikation auf «maps.wsl.ch»	19
Rahmenbedingungen	19
Vorteile einer Web-Applikation	20
«maps.wsl.ch»	20
Diskussion, Folgerungen	21
Bodentyp.....	21
Vegetationseffekte.....	22
Bestandescode	22
Web-Applikation «SHALLOW LANDSLIDES»	23
Ausblick.....	24
Fazit.....	25
Verdankungen	26
Literaturverzeichnis.....	27
Anhang	29
Anhang 1: Dokumentierte Rutschungen des 2002-er Ereignisses in Appenzell.....	29
Anhang 2: Multi Faktor Analyse (MFA) für die Dimensionen 3 und 4	30
Anhang 3: Beziehung quantitativer und qualitativer Eigenschaften flachgründiger Rutschungen	31
Anhang 4: Waldstruktur (schlecht- und gut-strukturiert), Topographie und Bodenfestigkeit	32

Fachlicher Abschlussbericht: WHFF-CH Projekt 2017.19

Abstract

Um die Frage «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» zu beantworten wurden für den Pilot-Kanton Appenzell Ausserrhoden die Rutschungen aus dem Jahre 2002 verwendet, zu welchen detaillierte Angaben für geotechnische Parameter sowie zum Bestandescode (Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung, Deckungsgrad) zur Verfügung stehen ([Hangmuren Datenbank](#) WSL). Zusätzlich wurde, basierend auf Fernerkundungsdaten (LiDAR, Orthophotos, Vegetationshöhenmodelle), der gesamte Waldbestand sowie die Geländemorphologie des Kantons charakterisiert und klassifiziert. Was den Effekt der Waldstruktur, charakterisiert durch die Bestandescode-Parameter (Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung, Kronen-Deckungsgrad) hinsichtlich Hangstabilität und damit dem Schutz vor flachgründigen Rutschungen betrifft, konnten die Erkenntnisse aus dem NFP68 Projekt «[SOSTANAH](#)»³ eindrücklich bestätigt werden. In gut strukturierten und gepflegten Wäldern treten signifikant weniger flachgründige Rutschungen auf und folglich kann, in Anlehnung an die «[3^D-Diversität](#)», mit kleinflächiger Bestandespflege die Schutzfunktion massgeblich beeinflusst und verbessert werden. Eine Multi-Faktor-Analyse (MFA), der eine Segmentierung der vier Bestandescode-Parameter und Grenzwerte für eine «optimale Waldstruktur» zu Grund gelegt wurde, wies für die Parameter Kronendeckungsgrad, Schichtung und Mischung des Bestandescodes bezüglich der zweiten Achse in abnehmender Reihenfolge des Effekts signifikanten Einfluss aus. Isoliert betrachtet haben im Falle des Ereignisses von Appenzell (2002) der Kronendeckungsgrad bezüglich der zweiten und die Mischung auf der dritten Achse einen signifikanten Effekt.

Aus bodenmechanischer Sicht sticht mit 90% (n=29) der grosse Anteil an geotechnisch klassifiziertem Bodenmaterial hervor, dessen Scherfestigkeit wesentlich von der Saugspannung beeinflusst wird. Nur in zwei Fällen erfolgte die Auslösung der Rutschung in reinen «Reibungsböden»; in einem Fall wurde das Bodenmaterial als intermediär klassifiziert. Betrachtet man nur die 29 Rutschungen in Bodenmaterial, das insbesondere durch die Saugspannung beeinflusst ist, nehmen alle Parameter des Bestandescodes in der zweiten Dimension signifikanten Einfluss. In Kombination mit bodenmechanischen Analysen und unter Einbezug der Ereignisse von Sachseln (1997) und St. Antönien (2005), kann ein Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ für eine hinsichtlich Versagenswahrscheinlichkeit kritische Hangneigung vorgeschlagen werden.

Durch die kombinierte Anwendung von Hangneigungs-Schwellenwert $\alpha_{lim}=35^\circ$ und «reduziertem» Bestandescode, konnte von den 32 analysierten Rutschungen des 2002-er Ereignisses im Kanton Appenzell nur eine identifiziert werden, welche allen Anforderungen der vorgeschlagenen Bestandescode Grenzwerte entsprach. Die Auslösung dieser Rutschung erfolgte in einem als instabil klassifizierten Geländemorphotyp mit einem Hangneigungswinkel α der exakt beim Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ lag. Unter Beachtung der teilweise eingeschränkten Datengrundlage, kann abschliessend die Kernfrage des Projekts «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» auf einem durchaus soliden wissenschaftlichen Fundament bejaht werden.

Im Hinblick auf eine praxistaugliche Umsetzung der komplexen Zusammenhänge wurde eigens die Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» – vorerst auf den Kanton Appenzell Ausserrhoden beschränkt – entwickelt und in unserer Umsetzungs-Plattform «[maps.wsl.ch](#)» implementiert. Diese interaktive Karte ermöglicht die Abschätzung des Schutzpotentials von Waldbeständen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen und unterstützt damit auf einfache Art und Weise ein nachhaltiges Waldmanagement, mit der Möglichkeit der Priorisierung von Pflegeeingriffen.

³ NFP68 Projekt: Webseiten auf [SNF](#) und [WSL](#)

Zusammenfassung

Im Fokus unseres WHFF-CH Projekts

«Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?
Interaktive Karten zur Wirkung gegen flachgründige Rutschungen»

standen zum einen die Charakterisierung der Waldstruktur basierend auf dem Bestandescode im Hinblick auf eine möglichst hohe Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen. Zum anderen waren es die grossräumige Zustandsansprache der Waldbestände und deren entsprechenden topographischen Verhältnisse mit Methoden der Fernerkundung sowie die kartographische Umsetzung in sogenannte «Interaktive Karten» mit einer Web-Applikation (maps.wsl.ch).

Ziel war es einerseits, Grenzwerte für die Bestandescode-Parameter zu definieren und somit für die Waldstruktur mit «optimaler» Wirkung auf die Hangstabilität und namentlich zur Verhinderung von flachgründigen Rutschungen. Damit gekoppelt sollten Richtwerte bodenmechanischer Kenngrössen für Hangstabilität, insbesondere die Scherparameter Reibungswinkel (Φ') und Kohäsion (c') in Kombination mit der Hangneigung (α) bestimmt werden. Die Basis dazu bildete der sogenannte «[3-Stufen-Filter](#)», welcher im Rahmen des NFP68 Projekts «[SOSTANAH](#)» (Graf *et al.* 2017; Fussnote 3) entwickelt wurde sowie die Erkenntnisse aus den wegweisenden bodenmechanischen Untersuchungen von Yildiz *et al.* (2019 a, b; 2020).

Für den Pilot-Kanton Appenzell Ausserrhoden wurden die Rutschungen aus dem Jahre 2002 verwendet, zu welchen detaillierte Angaben für geotechnische Parameter sowie zum Bestandescode (Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung, Deckungsgrad) zur Verfügung stehen (Datenquelle [Hangmuren-Datenbank](#), Eidg. Forschungsanstalt WSL, Forschungseinheit Gebirgshydrologie & Massenbewegungen). Zusätzlich wurde, basierend auf Fernerkundungsdaten (LiDAR, Orthophotos, Vegetationshöhenmodelle), der gesamte Waldbestand sowie die Geländemorphologie des Kantons charakterisiert und klassifiziert.

Was den Effekt der Waldstruktur hinsichtlich Hangstabilität und damit den Schutz vor flachgründigen Rutschungen betrifft, konnten die Erkenntnisse aus dem Projekt «[SOSTANAH](#)» eindrücklich bestätigt werden. In gut strukturierten und gepflegten Wäldern treten signifikant weniger flachgründige Rutschungen auf und folglich kann, in Anlehnung an die «[3^D-Diversität](#)» (Graf *et al.* 2017), mit kleinflächiger Bestandespflege die Schutzfunktion massgeblich beeinflusst und verbessert werden.

Aufgrund retrospektiver Analysen von 207 flachgründigen Rutschungen verschiedener Standorte und Ereignisse (Graf *et al.* 2017), konnten mit Hilfe des «[3-Stufen-Filters](#)» sowie statistischer Analyseverfahren die Segmentierung der vier Bestandescode-Parameter reduziert und Grenzwerte für eine «optimale Waldstruktur» vorgeschlagen werden. Basierend auf einer Multi-Faktor-Analyse (MFA) nehmen die Parameter Kronendeckungsgrad, Schichtung und Mischung des Bestandescodes bezüglich der zweiten Achse in abnehmender Reihenfolge des Effekts signifikanten Einfluss. Isoliert betrachtet haben im Falle des Ereignisses von Appenzell (2002) der Kronendeckungsgrad bezüglich der zweiten und die Mischung auf der dritten Achse einen signifikanten Effekt.

Aus bodenmechanischer Sicht sticht mit 90% (n=29) der grosse Anteil an geotechnisch klassifiziertem Bodenmaterial hervor, dessen Scherfestigkeit wesentlich von der Saugspannung beeinflusst wird. Nur in zwei Fällen erfolgte die Auslösung der Rutschung in reinen «Reibungsböden»; in einem Fall wurde das Bodenmaterial als intermediär klassifiziert. Werden nur die 29 Rutschungen in Bodenmaterial, das insbesondere durch die Saugspannung beeinflusst ist, nehmen alle Parameter des Bestandescodes in der zweiten Dimension signifikanten Einfluss.

In Kombination mit bodenmechanischen Analysen (Yildiz *et al.* 2019 a, b; 2020) wurde zudem ein Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ für eine hinsichtlich Versagenswahrscheinlichkeit kritische Hangneigung bestimmt.

Durch die kombinierte Anwendung von Hangneigungs-Schwellenwert $\alpha_{lim}=35^\circ$ und Bestandescode mit reduzierten Faktorstufen, konnte von den 32 analysierten Rutschungen des 2002-er Ereignisses im Kanton Appenzell nur eine identifiziert werden, welche allen Anforderungen der vorgeschlagenen Bestandescode Grenzwerte entsprach, wobei der Hangneigungswinkel α für diese Rutschung exakt beim Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ lag.

Mit Hilfe angewandter Fernerkundung und GIS Analysen wurden die für flachgründige Rutschungen relevanten geomorphometrischen Parameter sowie der Bestandescode zur Beschreibung der Waldstrukturen abgeleitet. Als Grundlage dienten das von swisstopo bereitgestellte Höhenmodell «[swis-](#)

[sALTI3D](#)» sowie die LiDAR-Daten der Messkampagne «[swissSURFACE3D](#)». Kernelemente sind «Einzelbäume», welche auf einem *spike-free* Vegetationshöhenmodell (Khosravipour *et al.* 2014, 2016) sowie dem Algorithmus von Dalponte & Coomes (2016) abgeleitet wurden. Die Einzelbäume sind «Träger der Waldstruktur» und ermöglichen dadurch in den interaktiven Karten nicht nur einen ersten visuellen Eindruck der Waldstruktur eines Bestandes, sondern erlauben auch statistische Abfragen innerhalb selektierter Flächen.

Für den einfachen Zugriff und eine praxistaugliche Anwendung wurde eigens die Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» entwickelt und in unserer Umsetzungs-Plattform «[maps.wsl.ch](#)» implementiert. Die vorerst auf den Kanton Appenzell beschränkte interaktive Karte ermöglicht es, die komplexen Zusammenhänge im Rahmen des Schutzpotentials von Waldbeständen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen auf einfache Art und Weise für ein nachhaltiges Waldmanagement anzuwenden, mit der Möglichkeit der Priorisierung von Pflegeeingriffen. Neben der Hangneigung können die vier Parameter des Bestandescodes eingeblendet werden, differenziert nach den verschiedenen Faktorstufen. Als Ergänzung stehen zudem zwei Feuchte-Indices (TWI: Topographic Wetness Index) zur Verfügung – ungewichtet und mit dem Sommerniederschlag gewichtet. Zudem können beliebige Höhenprofile angelegt und somit Informationen zur Topographie (Morphotypen) gewonnen werden.

Im Hinblick auf eine nachhaltige Schutzfunktion vor flachgründigen Rutschungen wird empfohlen, bei Eingriffen wo immer möglich, das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung zu fördern. Durch diese «dreidimensionale Diversität» – oberirdisch, unterirdisch sowie hinsichtlich Sukzession (zeitliche Diversität) – erhöht sich nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Widerstandskraft des gesamten Bestandes. Auch dessen Selbstregulierung wird so massgeblich gefördert.

Schlüsselwörter: Waldstruktur, Bestandescode, Fernerkundung, Hangstabilität, flachgründige Rutschungen, 3^D-Diversität, Kartographie, Web-Applikation

Übersicht

Die in diesem Bericht vorgestellten Resultate sowie die daraus abgeleiteten Folgerungen wurden grösstenteils im Rahmen des WHFF-CH Projekts

«Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?
Interaktive Karten zur Wirkung gegen flachgründige Rutschungen»

erarbeitet, welches als zielgerichtete Fortsetzung auf den Erkenntnissen des NFP 68 Projekts «[SOSTANAH](#)» (Soil Stability and Natural Hazards) aufbaut (Graf *et al.* 2017).

Im Vordergrund stand die Verbesserung von Wissen und Verständnis über die Zusammenhänge zwischen der Struktur von Waldbeständen und deren Schutzwirkung vor flachgründigen Rutschungen. Neben der Entwicklung von Instrumenten zur Beurteilung der Waldstruktur und Bewertung der Waldwirkung, wurden sogenannte «Interaktive Karten» erstellt und die entsprechenden räumlichen Daten kartographisch, interaktiv, agil und dynamisch in einer eigens designten Web-Applikation umgesetzt. Über diese «Kommunikations-Plattform» werden die Resultate auf einfache und verständliche Weise für Praxis, Administration, Wissenschaft und Bildungsinstitutionen sowie allen sonstig Interessierten, seien es Jugendliche oder Erwachsene zur Verfügung gestellt.

Zur Unterstützung von Forstpraxis und Waldmanagement, standen im Hinblick auf erfolgreich regulierende Eingriffe und nachhaltige Pflege- und Unterhaltsmassnahmen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen nachfolgende Aspekte im Fokus:

- Verbessertes Wissen über Zusammenhänge von Struktur und Wirkung von Wäldern hinsichtlich Schutz vor flachgründigen Rutschungen bereitstellen;
- Instrumente zur Beurteilung, respektive Bewertung von Waldstruktur und Schutzwirkung entwickeln;
- Praxistaugliche Umsetzung der Resultate in «Interaktiven Karten»;
- Strategien zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Wäldern zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen erarbeiten.

Im Mittelpunkt unseres Projekts standen die grossräumige Erfassung der Waldstruktur basierend auf dem Bestandscode mit Methoden der Fernerkundung sowie bodenmechanische Einflussgrössen in Bezug zur Hangstabilität (Scherfestigkeit), mit dem Ziel Richtwerte zur Beurteilung und Bewertung der Struktur und Schutzwirkung des Waldes abzuleiten. In diesem Zusammenhang kam der praxistauglichen Umsetzung grosses Augenmerk zuteil.

Unsere Feld- und Laboruntersuchungen sowie die Auswertung von Drohnenflügen, LiDAR-Daten, Orthophotos, Vegetationshöhenmodellen sowie weiterer Datenquellen dienten einerseits der Verbesserung des Prozessverständnisses von Boden-Pflanzen Interaktionen im Rahmen der Auslösung von flachgründigen Rutschungen im Wald. Andererseits sollte damit die Qualität der mittels Fernerkundung erhobenen Informationen gesteigert werden.

Flachgründige Rutschungen verursachen weltweit und namentlich in der Schweiz immer wieder grosse Schäden an Infrastruktur und Verkehrswegen. Nicht selten sind in diesem Zusammenhang auch Todesopfer zu beklagen (Badoux *et al.* 2016, Bezzola & Hegg 2007, 2008). Im Wissen um die Klimaveränderungen muss aufgrund fast aller Szenarien mit einer Zunahme solcher Ereignisse gerechnet werden (Brönnimann *et al.* 2018). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass in Zukunft Unwetterereignisse, welche zur Auslösung flachgründiger Rutschungen führen, zunehmen werden (Gariano & Guzzetti 2016).

Die Schutzfunktionen von Wäldern gegen Naturgefahren und namentlich zur Verhinderung von flachgründigen Rutschungen sind seit Alters her bekannt. Bereits die «alten Griechen» wussten um die Schutzwirkung von Wäldern und entsprechend wurde Respekt vor Bäumen und Wäldern gelehrt (Goulas & Graf 2003).

Dessen ungeachtet kam es immer wieder zu grossflächigen Entwaldungen, was vielerorts zu schwerwiegenden Schadenereignissen führte (Landolt 1862, Kaiser 1967). Im frühen 19. Jahrhundert wurden dann erste Methoden entwickelt, um betroffene Gebiete wieder angemessen zu bepflanzen und stabilisieren (Duile 1826, Demontzey 1878). Seit 1991 sind entsprechende Massnahmen in der Schweiz durch den Artikel 19 des Waldgesetzes festgehalten (WAG 1991).

Wälder üben im Rahmen ihrer Schutzwirkung gegen flachgründige Rutschungen essentielle Funktionen aus und beeinflussen dadurch zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlicher Zusammensetzung auf unterschiedlichen Ebenen unterschiedliche Prozesse. Zu den Schlüsselrollen zählen die hydrologische Regulierung des Bodenwasserhaushaltes, einerseits mittels Interzeption durch das Kronendach (Loshali & Sing 1992, Liu 1997, Park 2000, Price & Carlyle-Moses 2003, Deguchi *et al.* 2006) und andererseits, im Zusammenspiel mit den Wurzeln, über die (Evapo-)Transpiration und hydraulische Konduktivität. Dazu kommt die Boden- und Hangstabilisierung durch den Armierungseffekt der Wurzeln sowie die chemisch-biologische Zementierung von Aggregaten, gemeinsam mit ihren Symbiosepartnern, den Mykorrhizapilzen (Graf & Frei 2013). Die daraus resultierende Veränderung der Bodenstruktur führt zu einer Erhöhung der Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen, was sich wiederum positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt sowie Sukzessionsprozesse initiiert und beschleunigt, mit einhergehender Förderung der Diversität.

Einfluss und Auswirkungen auf diese Prozesse stehen sowohl in Abhängigkeit der Baumart und somit der Waldgesellschaften mit ihren charakteristischen Artenzusammensetzung als auch der Sukzession von Pflanzenassoziationen. Folglich sind hinsichtlich nachhaltigem Schutz vor flachgründigen Rutschungen durch Wälder pflanzensoziologische Informationen unabdingbar, um Bestände zielgerichtet zu pflegen und unterhalten (Spies *et al.* 2018).

Zur grossflächigen Beschreibung der Waldstruktur wurden im Rahmen des vorliegenden Projekts Fernerkundungsdaten verwendet. Diese werden zur Erstellung von Bestandskarten bereits seit einiger Zeit eingesetzt. Als Grundlage für die dazu verwendeten Vegetationshöhenmodelle (VHM) dienen insbesondere Orthophotos (Ackermann *et al.* 2020, Ginzler & Hobi 2016). Aufgrund der rasanten methodischen Entwicklung im Bereich der Fernerkundung sowie Bildanalyse wird heute – sofern vorhanden – auf LiDAR-Daten zurückgegriffen. Für die Schweiz startete «[siwsstopo](#)» 2017 die Messkampagne «[swissSURFACE3D](#)», welche bis 2023 zum Ziel hat, die Schweiz flächendeckend mit sehr genauen und hochaufgelösten LiDAR Daten abzudecken. Zur Erfassung der Bestandscode-Parameter Deckungsgrad, Schichtung und Entwicklung wurde im Rahmen dieses Projektes auf diesen Datensatz zurückgegriffen. Der Datensatz ermöglichte die Erstellung von hochaufgelösten «spike-free» Vegetationshöhenmodellen und die Ableitung von Einzelbäumen. Im Hinblick auf den Mischungsgrad wurde

der bereits bestehenden LFI Waldmischungslayer verwendet (Waser *et al.* 2021). Die beiden relevanten geomorphometrischen Parameter (Hangneigung und TWI) wurden vom Höhenmodell «[swis-SALTI3D](#)» abgeleitet.

Basierend auf dem in der Praxis verwendeten Bestandscode zur Charakterisierung von Wäldern sowie bodenmechanischen Erkenntnissen aus Vorgängerprojekten ([SOSTANAH](#)), wurden im Rahmen des WHFF-CH Projekts «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» Grenzwerte ermittelt, welche eine Abschätzung der potentiellen Schutzwirkung aktueller Bestände ermöglichen. Zudem unterstützen diese Ergebnisse in Form der «Interaktiven Karten» ein zielführendes und nachhaltiges Waldmanagement. Dank der dafür entwickelten Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» auf der Umsetzungsplattform «[maps.wsl.ch](#)» sind die räumlichen Daten in verständlicher und praxistauglicher Form schnell und einfach zugänglich.

Bestandes-Charakterisierung (Bestandscode)

Die Charakterisierung eines Waldbestandes verfolgt mannigfaltige Ziele auf unterschiedlichen Ebenen, sei es Wald als Holzlieferant, als Biodiversitäts-Hotspot, als Erholungsraum oder als Schutzwald. Für all diese «Ecosystem-Services» spielt die Waldentwicklung eine massgebende Rolle und somit auch die waldbauliche Analyse. Denn diese bildet im Forstbereich die entscheidende Grundlage für das Waldmanagement und entsprechend die Zielsetzungen waldbaulicher Massnahmen (Schütz 2003). Voraussetzung für eine adäquate Bestandesbeschreibung sind möglichst einfache, eindeutige und praxistaugliche Kriterien, passend zu den auszuführenden Eingriffen. Diese sogenannten typologischen Kriterien werden im Rahmen der schweizerischen Waldnutzung und -behandlung als Grundlage für waldbauliche Entscheidungen landesweit verwendet.

Im Hinblick auf Schutzwald-Funktionen und namentlich bezüglich der Stabilisierung steiler Hänge und damit verbunden der Verhinderung flachgründiger Rutschungen, hat sich die Verwendung des sogenannten Bestandscodes bewährt und etabliert.

Für die Untersuchungen im Rahmen des WHFF-CH Projekts «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» wurde als Basis der Bestandscode nach Rickli (2001) verwendet. Dieser beinhaltet vier Faktoren mit jeweils unterschiedlicher Anzahl von Abstufungen:

- Schichtung: unbestockt, ein-, zweischichtig, stufig (gut strukturiert)
- Entwicklungsstufe: unbestockt, Jungwuchs, Stangenholz, Baumholz I-III, stufig (gut strukturiert)
- Mischung: unbestockt, >80% Nadelbäume, Mischbestand, >80% Laubbäume
- Kronen-Deckungsgrad: unbestockt, aufgelöst [20%], lückig [40%], locker [60%], normal [80%], gedrängt [>90%]

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Anwendung des «[3-Stufen-Filters](#)» (Graf *et al.* 2017) wurden zudem die Kriterien und Grenzwerte für einen «optimalen Wald» zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen angepasst, wobei insbesondere die Waldzustandskategorien (W1 – W3) von Rickli (2001) miteinbezogen wurden. Diese erlauben es, zumindest bis zu einem gewissen Grad, die Vorgeschichte des Waldes zu integrieren und namentlich Störungen wie Windwurf, Kalamitäten durch Borkenkäfer oder Pilze aber auch Schäden durch Lawinen und andere Naturgefahren zu berücksichtigen. Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Störungsgeschichte im Hinblick auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen einen beträchtlichen Einfluss auf die Schutzwirkung von Waldbeständen ausübt (Bebi *et al.* 2019).

Im Zusammenhang mit den Analysen und namentlich den statistischen Auswertungen wurden zudem die Faktorstufen der einzelnen Parameter des Bestandscodes teilweise zusammengelegt (Tab. 1). Dieses Vorgehen ist einerseits dem eingeschränkten Datensatz geschuldet und dient andererseits der Reduktion der Modell-Komplexität und damit einer Vereinfachung der Interpretation der Resultate.

Daraus ergeben sich mit den angepassten Faktorstufen der Bestandscode-Parameter nachfolgende empfohlene Grenzwerte für einen «optimalen Schutzwald». Die «Entwicklungsstufe» beinhaltet Stangenholz und ältere Bestände, die «Mischung» wo immer möglich (Höhenstufe) einen Nadelholzanteil <80%, die «Schichtung» sollte mehrschichtig oder stufig sein sowie der «Deckungsgrad» in Abhängigkeit der Höhenstufe und Schichtung Werte von mehr als (40%) 60% und weniger als 80% (90%) aufweisen. So kann in der subalpinen Stufe auch ein minimaler Deckungsgrad von 40% ausreichend sein, falls der Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) ≥80% ist. Ein sehr hoher Deckungsgrad (>80%), kann sich jedoch insofern negativ auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen auswirken, falls er

im Zusammenhang mit einschichtigen, gedrängten Beständen steht, was insbesondere die natürliche Verjüngung und den Bodenwasserhaushalt beeinträchtigt.

Tabelle 1: Bestandscode-Parameter mit den verschiedenen Stufen nach Rickli *et al.* (2008) mit angepassten Faktorstufen (weisse Zahlen).

Grau: Unbestockte Flächen, in den (statistischen) Auswertungen nicht berücksichtigt
Grün: Stufen für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen gemäss NaiS (Frehner *et al.* 2005), Rickli (2001), Rickli *et al.* (2008) und «SOSTANAH» (Graf *et al.* 2017)
Braun: Stufen mit ungenügendem Schutz vor flachgründigen Rutschungen
Olive: Stufen in Abhängigkeit der Höhenlage und Schichtung mit «optimalem» respektive ungenügendem Schutz vor flachgründigen Rutschungen (siehe im vorhergehenden Text)

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	1 einschichtig	x1xx	1 Jungwuchs / Dichtung
2xxx	2 mehrschichtig	x2xx	2 Stangenholz
3xxx	2 gut strukturiert	x3xx	3 Baumholz I (BHD 20-35 cm)
		x4xx	3 Baumholz II (BHD 35-50 cm)
		x5xx	3 Baumholz III BHD >50 cm)
		x6xx	4 gut strukturierter Bestand
Mischung		Deckungsgrad (DG; Kronendeckung)	
xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
xx1x	1 > 80% Nadelholz	xxx1	1 (2) gedrängt (DG=90%)
xx2x	2 Mischbestand	xxx2	2 normal (DG=80%)
xx3x	3 > 80% Laubholz	xxx3	2 locker (DG=60%)
		xxx4	3 (2) lückig (DG=40%)
		xxx5	3 aufgelöst (DG=20%)

Bodenparameter (Geotechnik)

Gemäss USCS Bodenklassifikation (SN670010b 2011) wurden im Hinblick auf das Versagen drei Bodentypen unterschieden mit Bodenmaterial, welches vorwiegend durch i) Reibung (R), ii) Saugspannung (S) oder eine iii) Kombination (I) davon stabilisiert wird (Tab. 2).

Tabelle 2: Anteile [n, %] für alle ($\alpha=[25^\circ, 50^\circ]$) flachgründigen Rutschungen sowie für jene mit Hangneigungen von $\alpha \leq 35^\circ$ in den Gebieten Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) in Abhängigkeit der dominierenden Kräfte gegen Abgleiten, namentlich Reibung (R), Saugspannung (S) sowie Kombination von Reibung und Saugspannung (I: intermediär).

	Reibung [R]	Saugspannung [S]	Kombination [I]	alle [n, %]	$\alpha \leq 35^\circ$ [n, %]
Sachseln 1997	n=0, 0.0%	n=73, 67.0%	n=36, 33.0%	109 / 100	19 / 17.4
Appenzell 2002	n=2, 6.2%	n=29, 90.6%	n= 1, 3.1%	32 / 100	21 / 65.6
St. Antönien 2005	n=1, 4.3%	n=17, 73.9%	n= 5, 21.7%	23 / 100	17 / 73.9
$\Sigma_{\text{Total n}}$	3	119	42	164	57
%-Anteil	1.8	72.6	25.6	100	34.8

Neben der Berücksichtigung der in der entsprechenden Norm aufgelisteten Parametern stützt sich die Einteilung zu diesen Bodentypen namentlich auf die Ergebnisse der Untersuchungen von Yildiz *et al.* (2018, 2019a, 2019b). Die Stabilität gegen Abgleiten des Bodenmaterials der flachgründigen Rutschungen, die während des Unwetters 2002 im Untersuchungsperimeter von Appenzell Ausserrhoden ausgelöst wurden, war in gut 90% der Fälle (n=29) durch Saugspannung dominiert⁴. Auf ausgesprochene

⁴ «Saugspannungsböden» sind durch einen relativ hohen Kohäsionsanteil charakterisiert. Die Boden-Klassifikation fand nur stichprobenhaft mit exakten Labormethoden statt. Grösstenteils wurde diese gutachtlich im Felde durchgeführt. Entsprechend können gewisse Fehlzuordnungen nicht ausgeschlossen werden.

Reibungsböden fielen zwei Ereignisse und eine Rutschung wurde in intermediärem Bodenmaterial registriert (Tab. 2).

Auch in Sachseln (1997) sowie in St. Antönien (2005) konnte die grosse Mehrheit der Rutschungen dem «Saugspannungs-Bodentyp» zugeordnet werden. Der «Reibungs-Bodentyp» wurde nicht, respektive nur in einem Fall dokumentiert, wohingegen der intermediäre Bodentyp mit einem Fünftel respektive Drittel vergleichsweise stärker vertreten war (Tab. 2).

Über alle drei Ereignisse betrachtet fanden gut 90% der in den oben erwähnten Untersuchungsgebieten aufgetretenen flachgründigen Rutschungen in Böden statt, deren Stabilität (vorwiegend) durch die Saugspannung beeinflusst wird.

Hinsichtlich Scherparameter ist die Kohäsion c' entsprechend ausgeprägt und relevant. Der Anteil an reinen Reibungsböden, bei welchen für die Sicherheit gegen Abgleiten insbesondere der Reibungswinkel Φ' massgebend ist, beläuft sich auf <2%. (Tab. 1, 2; Abb. 1).

Waldstruktur, Topographie und Bodenmechanik

Mit der gekoppelten Analyse der geotechnischen Bodenkenndaten und «reduzierten» Bestandescode-Parametern hinsichtlich guter und unzureichender (schlechter) Waldstruktur, konnte für den Hangneigungswinkel ein Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ ermittelt werden. Unter Anwendung dieses Grenzwertes konnte von den 32 analysierten Rutschungen des 2002-er Ereignisses im Kanton Appenzell nur eine identifiziert werden, welche allen Anforderungen der vorgeschlagenen Bestandescode Grenzwerten entsprach, wobei für diese Rutschung der Hangneigungswinkel α exakt beim Schwellenwert von $\alpha_{lim}=35^\circ$ lag (Abb. 1. Anhang 1).

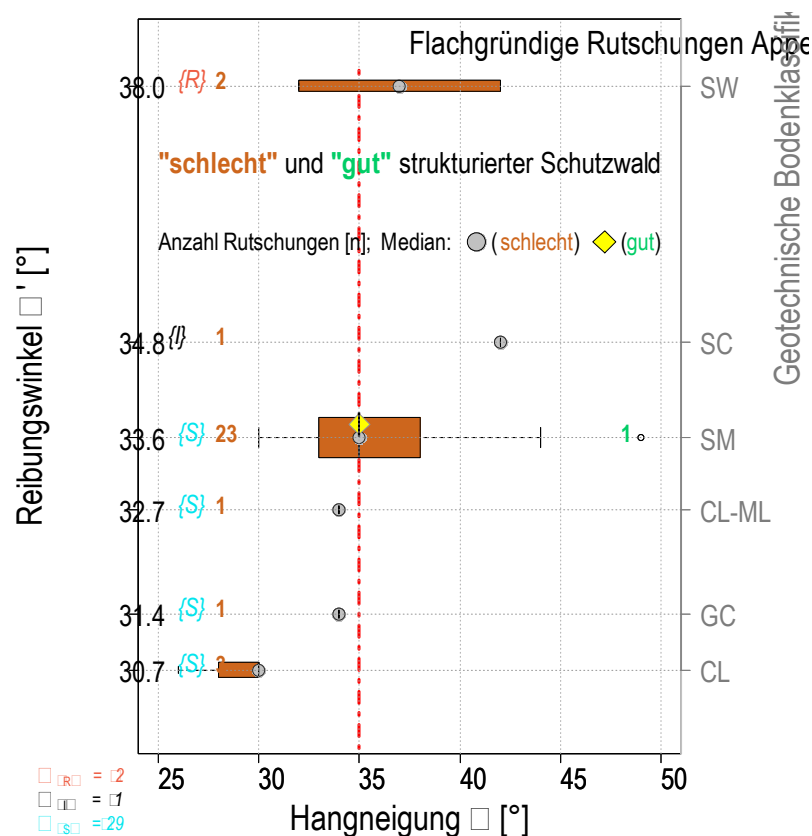


Abbildung 1: Flachgründige Rutschungen des Ereignisses Appenzell 2002 gruppiert nach Bodentyp (R=Reibung, I=Intermediär, S=Saugspannung; Tab. 2) in Abhängigkeit von Hangneigung und Waldstruktur (gut, Median: ♦; schlecht, Median: ●) und unter Angabe der Bodenklassifikation mit zugehörigem Reibungswinkel sowie dem Grenzneigungswinkel $\alpha_{lim}=35^\circ$ (strich-punktierte rote Linie).

Dieser Wert wird sowohl durch die Analysen der Rutschungen des Ereignisses von Sachseln 1997 (Graf *et al.* 2017) als auch jenen von St. Antönien aus dem Jahre 2005 bestätigt. Die Auswertungen der Daten von Sachseln mit einem einfachen, auf Normalverteilung basierenden statistischen Ansatz (Graf & Grunder 2017), ergaben einen kritischen Hangneigungswinkel von $\alpha=38^\circ$.

Was die Rutschungen von St. Antönien betrifft, ergaben die Analysen von Moos *et al.* (2016) in Kombination mit Wald-Lückenlängen einen Schwellenwert von $\alpha=36^\circ$. Es zeigte sich, dass von den 46 in St. Antönien untersuchten, flachgründigen Rutschungen die Hälfte in Waldlücken (unzureichend strukturiert) mit einer Länge in Falllinie von $L>40\text{m}$ stattfanden und 43 ($\approx 94\%$) mit $L>20\text{m}$. In den stabilen Kontrollflächen (gut strukturierte Bestände) wiesen 6 Lücken (13%) eine Länge von $L>40\text{m}$ auf und die Hälfte eine solche von $L>20\text{m}$. Wird diesem Umstand Rechnung getragen und die zulässige Lückengröße mit $L\leq 40\text{m}$ festgelegt, sollte die Hangneigung α als nächster Entscheidungsparameter mit $\alpha\leq 36^\circ$, respektive unter Berücksichtigung geotechnischer Auswertungen mit $\alpha\leq 35^\circ$, gewählt werden, um in gut strukturierten Wäldern (stabile Kontrollflächen) nach wie vor eine möglichst hohe Sicherheit gegen Abgleiten gewährleisten zu können.

Von den 32 untersuchten Rutschungen des Unwetterereignisses im Jahre 2002 in Appenzell konnte das betroffene Bodenmaterial in 23 Fällen ($\sim 72\%$) als SM (USCS 2011) klassifiziert werden sowie drei Rutschungen als CL und je eine als CL-ML und GC. In diesen Bodentypen wird die Festigkeit namentlich durch Saugspannung beeinflusst. Sogenannte Reibungsböden waren zweimal (SW) und intermediäres Bodenmaterial einmal (SC) betroffen.

Auch bei der Zuordnung der Rutschungen zur umgebenden Topographie respektive zu sogenannten Gelände-Morphotypen konnte eine klare Häufung festgestellt werden. Gut drei Viertel der Rutschungen wurde in den Morphotypen 6 (14) und 9 (10) ausgelöst. Dazu kommen 4 im Typ 3, zwei im Typ 8 sowie je eine Rutschung in den Typen 1 und 5 (Abb. 2a).

Hinsichtlich der Morphotypen gibt es zudem eine klare Trennung zwischen guter und «schlechter» Waldstruktur. Erstere war ausnahmslos in den Typen 1, 3 und 5 betroffen, Letztere insbesondere in 6 und 9 sowie zweimal in 8 (Abb. 2b).

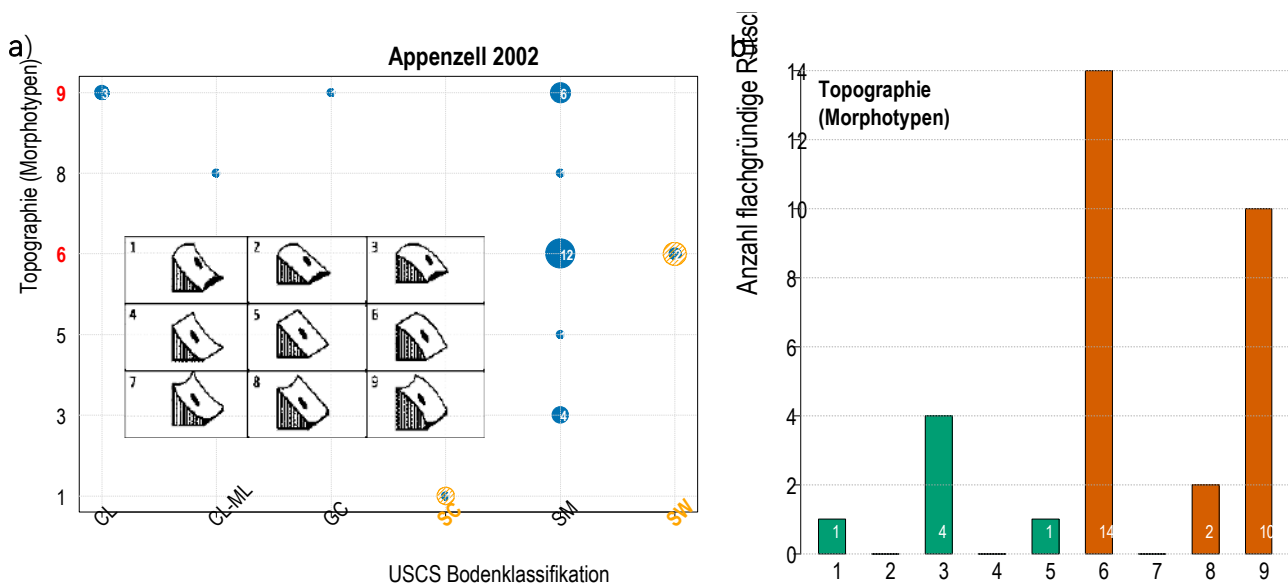


Abbildung 2: a) Anzahl Rutschungen (proportionale blaue Kreisflächen) des Ereignisses Appenzell 2002 in den Morphotypen (dominierend) nach Rickli (2001) in Abhängigkeit der USCS-Bodenklassifikation (orange und schraffiert: Bodentyp SC «intermediär» und SW «Reibung») – sowie b) der Waldstruktur (gut, schlecht).

Rutschungen in Abhängigkeit von Waldstruktur und Hangneigung (α)

Von 164 in der Analyse berücksichtigten Rutschungen fanden in den Untersuchungsgebieten Sachseln, Appenzell und St. Antönien 148 in unzureichend strukturierten Wäldern statt, was einem Anteil von $\sim 90\%$ entspricht. Wird der von uns ermittelte Schwellenwert für den Hangneigungswinkel $\alpha_{lim}=35^\circ$ zugrunde gelegt, sind es wiederum gut 90% der Rutschungen (Sachseln: 90%, Appenzell: 95%, St.

Antönien: 95%), welche an Hängen von «schlecht» strukturierten Wäldern mit einem Neigungswinkel $\alpha \leq 35^\circ$ ausgelöst wurden (Tab. 3).

Tabelle 3: Anteile [n, %] von flachgründigen Rutschungen in den Untersuchungsgebieten Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) an Hängen mit einem Neigungswinkel $\alpha \leq 35^\circ$ sowie für alle Rutschungen ($25^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$) in Abhängigkeit der Waldstruktur (gut, schlecht).

	$\alpha \leq 35^\circ$		Summe Σ [n, %]	$25^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$	
	Waldstruktur gut	schlecht		alle Rutschungen [n, %] gut	schlecht
Sachseln 1997	n=2, 10.0%	n=17, 90.0%	n=19, 100	14 / 12.8	95 / 87.2
Appenzell 2002	n=1, 5.0%	n=20, 95.0%	n=21, 100	1 / 3.1	31 / 96.9
St. Antönien 2005	n=1, 5.9%	n=16, 94.9%	n=17, 100	1 / 4.5	22 / 95.5
$\Sigma_{\text{Total n}}$	4	53	57	16	148
%-Anteil	7	93	100	9.8	90.2

Rutschungen in gut strukturierten Wäldern $\left[\begin{smallmatrix} \alpha \leq 35^\circ \\ 25^\circ \leq \alpha \leq 49^\circ \end{smallmatrix} \right]$				
- Sachseln 1997:	1.8%	($\alpha \leq 35^\circ$)	von allen Rutschungen	(n=109)
- Appenzell 2002:	3.1%	($\alpha \leq 35^\circ$)	von allen Rutschungen	(n=32)
- St. Antönien 2005:	4.3%	($\alpha \leq 35^\circ$)	von allen Rutschungen	(n=23)
- alle Gebiete:	2.4%	($\alpha \leq 35^\circ$)	von allen Rutschungen	(n=164)

Statistik (Multifaktor-Analyse, MFA)

Im Hinblick auf das Verständnis des komplexen Zusammenspiels zwischen meteorologischen, geographischen, biologischen, bodenphysikalischen, geotechnischen und hydrologischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Auslösung flachgründiger Rutschungen und dem Schutzpotential von Waldbeständen wurde eine multivariate statistische Auswertung durchgeführt. Mit einer sogenannten Multi Faktor Analyse (MFA, *Husson et al.* 2017), welche die Gruppenstruktur mit numerischen und kategorialen Variablen berücksichtigt, konnten für die flachgründigen Rutschungen des Ereignisses in Appenzell im Jahre 2002 durch die ersten beiden Dimensionen 36.1% (Dim1), respektive 26.0% (Dim2) der Varianz erklärt werden. Insgesamt beläuft sich der Anteil erklärter Varianz für die ersten beiden Dimensionen (Hauptkomponenten) somit auf 62.0%, für die ersten vier auf knapp 90% - (Abb. 3, 4a; n=32). Die MFA für Dim3 und Dim4 befindet sich im Anhang 2. Damit wird mit vergleichbarem Datensatz ein ähnlich hohes Niveau erreicht wie bei der retrospektiven Analyse mit dem «[3-Stufen-Filter](#)» (n=218; *Graf et al.* 2017).

Für die Analyse der Resultate wurden in der Gruppe der numerischen Variablen die Höhenlage und Hangneigung α sowie Feinanteil f_c , Reibungswinkel Φ' , Wassergehalt ω , Kohäsion c' und Porenziffer ε (Tab. 4), in jener der kategorialen Variablen der Bodentyp (Tab. 5), die Faktoren des Bestandescodes (Entwicklungsstufe, Mischung, Schichtung und Deckungsgrad; Tab. 6) sowie die Topographie (Tab. 6) berücksichtigt.

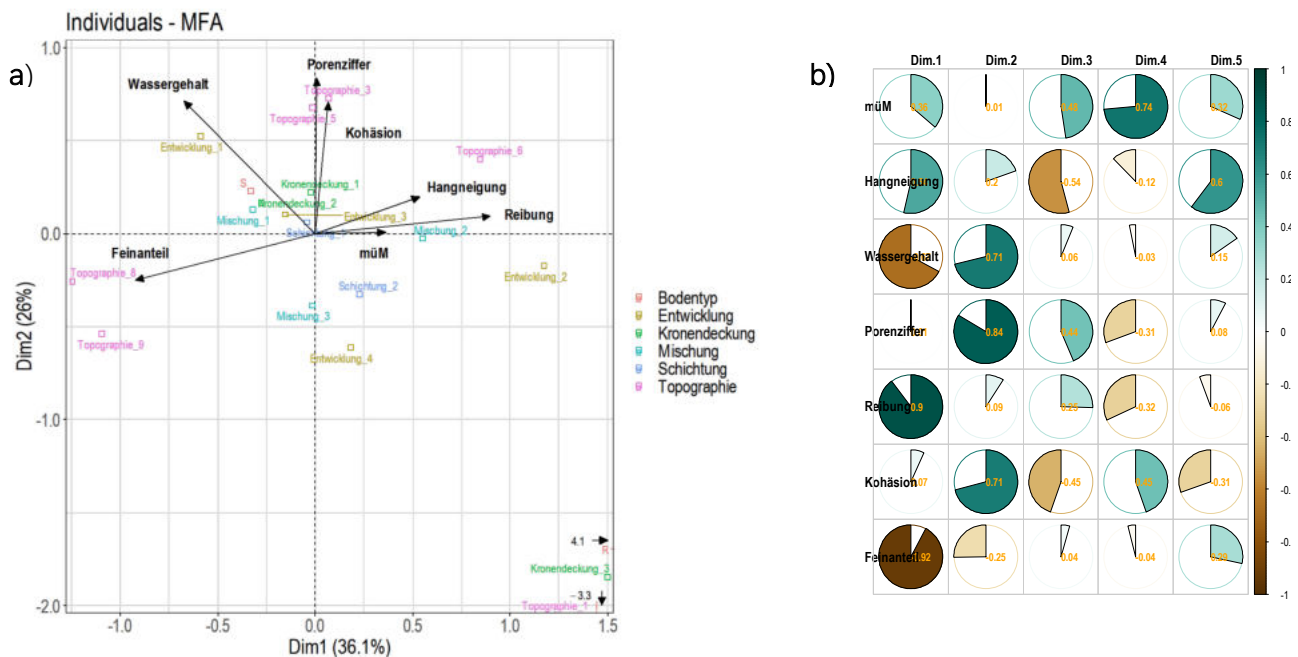


Abbildung 3: a) Multi Faktor Analyse (MFA) mit erster (Dim1) und zweiter (Dim2) Hauptkomponente der flachgründigen Rutschungen von Appenzell 2002 (Dim3 und Dim4 im Anhang 2).
 Numerische Variablen: Höhenlage, Hangneigung α ; Feinanteil f_c , Reibungswinkel Φ' , Wassergehalt w , Kohäsion c' , Porenziffer e
 Kategorielle Variablen: Topographie, Bodentyp, Entwicklungsstufe, Mischung, Schichtung, Deckungsgrad
 b) Korrelation ($\cos^2$) der numerischen Variablen bezüglich der fünf Hauptkomponenten (siehe auch Abb. 4).

Quantitative (numerische) Faktoren

Die Multi Faktor Analyse der 32 flachgründigen Rutschungen bringt den Einfluss der Bodenparameter unmissverständlich zum Vorschein. In der Summe tragen die berücksichtigten geotechnischen Faktoren bezüglich der ersten Hauptkomponente (Dim1) mit über 83% zur insgesamt erklärten Varianz von 36.1% bei. Dabei dominieren namentlich der Reibungswinkel Φ' mit positiver sowie Feinanteil und Wassergehalt mit negativer Korrelation. Ebenfalls signifikant und positiv korreliert sind Hangneigung und Höhenlage.

Bezüglich der zweiten Hauptkomponente (Dim2) gehören zu den signifikanten Parametern die Porenziffer und Kohäsion sowie der Wassergehalt, welche alle positiv korreliert sind. Diese drei bodenmechanischen Charakteristiken steuern den Hauptanteil (94%) zur erklärten Streuung von total 26.0% in Dim2 bei (Tab. 4).

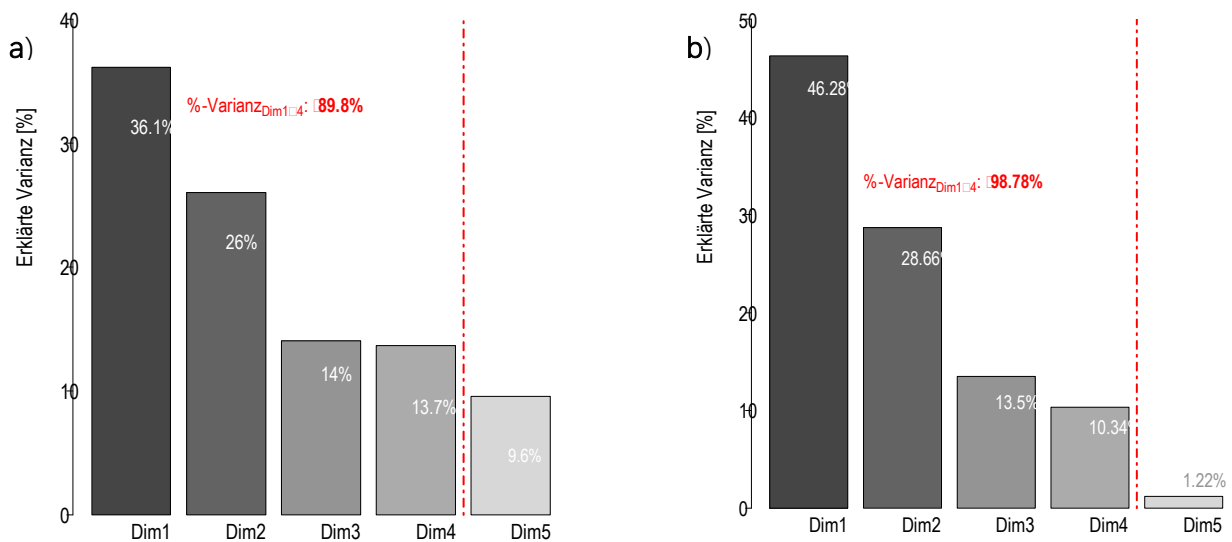


Abbildung 4: Erklärte Varianz der Multi Faktor Analyse (MFA) bezüglich aller Hauptkomponenten für a) alle Bodentypen (Reibung «R», Intermediär «I», Saugspannung «S»; n=32) sowie b) den Bodentyp «S» getrennt (n=29).

Beschränkt man die Multi Faktor Analyse (MFA) der Appenzeller Rutschungen auf Bodenmaterial, das vorwiegend durch die Saugspannung beeinflusst ist – 29 von 32 Rutschungen – erhöht sich die erklärte Varianz in den ersten 4 Dimensionen von 89.8% auf 98.8%, wovon 10.1% auf Dim1 fallen (Abb. 4 a, b: Abb. 6 Kapitel Diskussion). Dieser signifikante Anstieg ist insbesondere auf den beträchtlichen Beitrag der Kohäsion von 26.5% zurückzuführen – 0.2% in der vollständigen Analyse (Tab. 5).

Tabelle 4: Erklärte Varianz, Korrelation und p-Wert der einzelnen numerischen Variablen bezüglich der ersten beiden Hauptkomponenten (Dim1, Dim2).

	<u>Dim1</u> [%var] 36.1	Korrelation $\cos^2$ [-1,1]	p-Wert [0,1]	<u>Dim2</u> [%var] 26.0	Korrelation $\cos^2$ [-1,1]	p-Wert [0,1]
Hangneigung α [°]	11.35	0.5359	$1.5 \cdot 10^{-3}$	2.12	0.1966	n.s.
m ü. M. [m]	5.16	0.3613	$4.2 \cdot 10^{-2}$	0.002	0.0058	n.s.
Feinanteil f_c [%]	33.58	-0.9218	$7.1 \cdot 10^{-14}$	3.50	0.2525	n.s.
Reibungswinkel Φ' [°]	31.88	0.8980	$3.2 \cdot 10^{-12}$	0.47	0.0921	n.s.
Wassergehalt ω [%]	17.84	-0.6718	$2.5 \cdot 10^{-5}$	27.86	0.7120	$4.9 \cdot 10^{-6}$
Kohäsion c' [kN·m ⁻²]	0.18	0.0678	n.s.	27.59	0.7085	$5.7 \cdot 10^{-6}$
Porenziffer ε [-]	0.003	0.0090	n.s.	38.45	0.8363	$2.5 \cdot 10^{-9}$
Total [%var] Dim1 Dim2	100.00			100.00		

Qualitative (kategoriale) Faktoren

Bodentyp

Was die kategoriellen Variablen betrifft, weist der Bodentyp bezüglich der ersten Hauptkomponente (Dim1) die höchste Korrelation auf, nimmt jedoch auch in Dim2 und Dim3 einen signifikanten Einfluss (Tab. 5).

Tabelle 5: Erklärte Varianz, Korrelation und p-Wert der einzelnen Bodentypen (kategoriale Variable) bezüglich der ersten beiden Hauptkomponenten (Dim1, Dim2).

Bodentyp (R, I, S)	Dim1 [%var]	Korrelation cos ² [0,1]	p-Wert [0,1]	Dim2 [%var]	Korrelation cos ² [0,1]	p-Wert [0,1]
Bodentyp		0.4795	7.7 e ⁻⁰⁵		0.3904	0.0047
Reibung	7.7 e ⁻³²	7.7 e ⁻³⁴	2.9 e ⁻⁰⁵	93.75	1.0000	n.s.
Intermediär (Reibung/Saugspannung)	96.67	1.00	n.s.	0.21	0.0022	0.0126
Saugspannung	3.33	0.36	6.7 e ⁻⁰⁵	6.04	0.6444	0.0018
Total [%var] Dim1 Dim2	<u>100.00</u>			<u>100.00</u>		

Bestandescodes

Seitens Bestandescodes ist es vorab die Kronendeckung, welche den grössten Einfluss nimmt. Sie ist mit Dim2 positiv korreliert und signifikant. Dies gilt zudem für die Mischung in Dim3 (cos²=0.37; p-Wert=0.028). Mit 36% hat die Entwicklungsstufe den grössten Anteil an der gesamten Varianz, gefolgt von Mischung (27%), Schichtung (19%) und Kronendeckung (18%) – in Tabelle 6 sind die entsprechenden Kennwerte nur für Dim1 und Dim2 angegeben.

Tabelle 6: Erklärte Varianz, Korrelation und p-Wert der Parameter des Bestandescodes (kategoriale Variable) bezüglich der ersten beiden Hauptkomponenten (Dim1, Dim2).

Waldstruktur (Bestandescodes)	Dim1 [%var]	Korrelation cos ² [0,1]	p-Wert [0,1]	Dim2 [%var]	Korrelation cos ² [0,1]	p-Wert [0,1]
Entwicklung [%var _{Dim1}]	36.0		n.s.	54.2		n.s.
Jungwuchs/Dickung	8.41	0.2091	n.s.	27.17	0.4550	n.s.
Stangenholz	0.81	0.0215	n.s.	5.24	0.2525	n.s.
Baumholz strukturiert	7.34	0.7068	n.s.	0.001	7.4 e ⁻⁰⁵	n.s.
	19.42	0.5343	n.s.	21.82	0.4045	n.s.
Mischung [%var _{Dim1}]	27.0		n.s.	6.1		n.s.
Nadelholz (>80%)	3.74	0.1920	n.s.	0.93	0.0322	n.s.
Mischbestand	0.70	0.0245	n.s.	0.11	0.0027	n.s.
Laubholz (>80%)	22.55	0.6430	n.s.	5.08	0.0976	n.s.
Schichtung [%var _{Dim1}]	19.1		n.s.	28.6		n.s.
einschichtig	2.99	0.4599	n.s.	4.46	0.4631	n.s.
mehrschichtig	16.12	0.4599	n.s.	24.09	0.4631	n.s.
Kronendeckung [%var _{Dim1}]	17.9		n.s.	11.1	0.1946	0.0433
gedrängt [>90%]	2.01	0.0862	n.s.	0.71	0.0206	n.s.
normal / locker [(40)60-80%(90)]	0.16	0.0074	n.s.	0.36	0.0110	n.s.
(lückig) aufgelöst [<(40)20%]	15.74	0.4179	n.s.	10.03	0.1795	0.0116
Total [%var] Dim1 Dim2	<u>100.00</u>			<u>100.00</u>		

Werden die drei Rutschungen auf Bodenmaterial, dessen Festigkeit vorwiegend durch Reibung bestimmt ist – zweimal SW und einmal SC (Abb. 2a) – ausgeschlossen, nimmt der Einfluss der Bestandescode-Parameter markant zu. Dies gilt namentlich für die Schichtung ($\cos^2=0.18$; p-Wert=0.02), welche mit Dim2 korreliert ist, was ebenfalls für die Kronendeckung zutrifft ($\cos^2=0.43$; p-Wert=6.7e⁻⁴). Die Mischung korreliert mit Dim4 ($\cos^2=0.57$; p-Wert=0.03).

Die meisten Rutschungen wurden in einschichtigen von Nadelholz dominierten Beständen mit einer Kronendeckung von je zur Hälfte in den Klassen 50-80% und >80% in der Entwicklungsstufe Baumholz registriert (Zentrums nahe Punkte in Anhang 3).

Werden die Bestandescode-Parameter einzeln der Hangneigung und den bodenmechanischen Kenngrößen gegenübergestellt, wird offensichtlich, dass die flachgründigen Rutschungen in Beständen mit einem Kronendeckungsgrad <60% in Bodenmaterial ausgelöst wurden, das durch geringeres Porenvolumen und entsprechend eine tiefere Wasserrückhaltekapazität (Wassergehalt) charakterisiert ist. Gleiches gilt für die Rutschung im Morphotyp 1, welche als einzige auf intermediärem Bodenmaterial (SC, Abb. 2a) stattgefunden hat (Anhang 3).

Hinsichtlich der Unterscheidung zwischen gut und unzureichend strukturierten Beständen tritt als entscheidender und dominanter diskriminierender Parameter die Schichtung in Erscheinung, mit 27 Rutschungen in ein- und nur 5 in mehrschichtigen Waldbeständen. Als weiterer differenzierender Parameter erweist sich die Mischung, für welche die Anzahl Rutschungen negativ mit dem Laubholzanteil korreliert ist – 17 Rutschungen in Beständen mit mehr als 80% Nadelholz, 10 in Mischbeständen und 5 in solchen mit mehr als 80% Laubholz (Anhang 4).

Topographie

Was die Topographie und damit verbunden die geomorphologischen Verhältnisse im Nahbereich der ausgelösten Rutschungen betrifft, sind die nach Rickli (2001) angewandten Morphotypen 6 und 9 in Dim1 signifikant, wobei ersterer positiv und letzterer negativ korreliert ist (Tab. 7). Für diese beiden Morphotypen wurde denn auch mit 24 von 32 Rutschungen eine markante Häufung festgestellt, wobei es sich ausnahmslos um Bestände handelte, welche als unzureichend strukturiert eingestuft sind (Anhang 4). Entsprechend können diese beiden geomorphologischen Formen, zusätzlich zum Schichtungs-Parameter des Bestandescodes, für die Appenzeller Rutschungen als weiteres diskriminierendes Merkmal verwendet werden.

Werden nur die Rutschungen auf Bodenmaterial, das vornehmlich durch die Saugspannung gefestigt wird berücksichtigt (n=29), steigt der Einfluss der Topographie und ist bereits bezüglich Dim1 signifikant ($\cos^2=0.34$; p-Wert=0.033).

Tabelle 7: Erklärte Varianz, Korrelation und p-Wert der einzelnen Morphotypen (kategoriale Variable) bezüglich der ersten beiden Hauptkomponenten (Dim1, Dim2).

Topographie (Morphotyp)	<u>Dim1</u> [%var]	Korrelation $\cos^2$ [0,1]	p-Wert [0,1]	<u>Dim2</u> [%var]	Korrelation $\cos^2$ [0,1]	p-Wert [0,1]
Topographie		0.3322	0.0499			n.s.
Morphotyp 1 (konkav-konvex)	2.5 e ⁻²⁹	7.4 e ⁻⁰⁵	n.s.	0.00	0.0000	0.0126
Morphotyp 3 (konvex-konvex)	3.29	0.0376	n.s.	10.20	0.1166	n.s.
Morphotyp 5 (flach-flach)	0.87	0.0090	n.s.	60.84	0.6280	n.s.
Morphotyp 6 (konvex-flach)	8.61	0.1530	0.0068	25.97	0.4617	n.s.
Morphotyp 8 (flach-konkav)	86.67	0.9244	n.s.	0.11	0.0012	n.s.
Morphotyp 9 (konvex-konkav)	0.56	0.0082	0.0075	2.87	0.0417	n.s.
Total [%var] Dim1 Dim2	<u>100.00</u>			<u>100.00</u>		

Fernerkundung

Relevante geomorphometrische sowie die Bestandscode-Parameter wurden mit Hilfe angewandter Fernerkundung und GIS Analysen abgeleitet und bilden das Fundament der Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)», welche auf der Umsetzungs-Plattform «[maps.wsl.ch](#)» implementiert ist.

Die Berechnungen der Hangneigung sowie der Topographischen Feuchte-Indices (TWI: Topographic Wetness Index) fassen auf dem sehr präzisen digitalen Höhenmodell «[swissALTI3D](#)», welches die Geländeformen der Schweiz ohne Bewuchs und Bebauung beinhaltet. Für die Ableitungen wurde auf Rastergrössen von 10m (Hangneigung) und 5m (TWI) zurückgegriffen.

Als Grundlage für die Ableitung der Waldstrukturen dienten insbesondere Teile des hochgenauen LiDAR-Datensatzes von «[swissSURFACE3D](#)», in welchem die Oberfläche der Schweiz mit allen darin enthaltenen Elementen in Form einer klassifizierten Punktwolke enthalten sind. Für das vorliegende Projekt wurden namentlich die beiden Klassen «Boden» und «Vegetation (tief-mittel-hoch)» verwendet. Die Daten für den Kanton Appenzell Ausserrhoden (AR) stammen aus den Jahren 2017/2018 und wurden im Hinblick auf eine möglichst detaillierte Bodeninformation in der laub- und schneefreien Zeit durchgeführt.

Für die Ableitung der Geodaten wurden die Softwareprodukte [LASTools](#), [SAGA GIS](#), [ESRI ArcGIS Pro](#) sowie [R](#) verwendet.

Hangneigung

Die Hangneigung basiert auf dem von «[siwsstopo](#)» zur Verfügung gestellten Layer «Hangneigungsklassen» und wurde von «[swissALTI3D](#)» mit einer Auflösung von 10m abgeleitet.

Topographischer Feuchte-Index (TWI)

Der TWI (Topographic Wetness Index) ist ein Indikator für den Zustand der «Nässe» und quantifiziert hydrologische Prozesse in Bezug auf die Oberflächentopographie (Beven & Kirkby 1979), welche er somit indirekt abbildet. Zudem dient er als Proxy für den Bodenwasserhaushalt, als wichtigster Auslösefaktor flachgründiger Rutschungen.

Für die Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» wurde der TWI von «[swissALTI3D](#)» mit einer Auflösung von 5m abgeleitet. Die Berechnung der Fliesswege ist überaus entscheidend und wurde nach Qin *et al.* (2001) umgesetzt, mit einer Gewichtung auf Basis des maximalen Gefälles und der Möglichkeit mehrere Fliessrichtungen in benachbarte Zellen zu wählen.

Um den Einfluss des Sommerniederschlags auf den TWI einfließen zu lassen, wurde er zusätzlich mit den durchschnittlichen Niederschlagssummen der Periode Juni-August im Bezugszeitraum 1981-2010 gewichtet. Die Niederschlagsdaten wurden in Anlehnung an Thornton *et al.* (1997) mit «Daymet» (daily meteorological maps) auf einer Rastergrösse von 100m modelliert unter Berücksichtigung aller MeteoSchweiz-Stationen.

Vegetationshöhenmodelle (VHM)

Um die Auswirkungen von Rastergrösse und Glättungsmethoden auf die Genauigkeit unterschiedlicher Algorithmen zur Einzelbaumerkennung zu beurteilen, wurden auf Grundlage der normalisierten LiDAR-Punktwolken verschiedene Vegetationshöhenmodelle mit unterschiedlichen Ansätzen und Auflösungen erstellt. Neben «Punkt zu Raster Prozessierung» der Punktwolke mit Auflösungen von 0.5 und 1m (siehe Ginzler & Hobi 2016) wurden unter Einsatz des «pit-free/spike-free Algorithmus» (Khosravipour *et al.* 2014, 2016) Modelle mit den Auflösungen 0.3, 0.5 und 1m erzeugt.

Der Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» liegt das VHM gemäss Khosravipour *et al.* (2014, 2016) mit einer Auflösung von 0.5m zugrunde, maskiert mit der «[LFI Waldmaske](#)» und dem «[swiss-Buildings3D](#)» Datensatz (Ginzler & Hobi 2016).

Einzelbaumdetektion

Die Einzelbäume werden zur Ableitung der Entwicklungsstufe verwendet sowie zur Erfassung der Statistiken innerhalb der Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)». Die Einzelbäume entsprechen den dominanten Bäumen eines Standortes. Bäume unter dem Kronendach können mit den verwendeten Algorithmen nur sehr schwer bzw. gar nicht erkannt werden. Die Einzelbäume sind zudem in den interaktiven Karten die «Träger» weiterer Baum- und Bestandes-Informationen wie beispielsweise abgeleitete Höhe, Umfang oder Mischungsgrad und geben den Anwenderinnen und Anwendern einen ersten visuellen Eindruck des auf der interaktiven Karte betrachteten Ausschnittes.

Zur Bestimmung der Einzelbäume wurden unterschiedliche, in der Literatur beschriebene Algorithmen mit den oben beschriebenen VHMs sowie auf Basis der ursprünglichen Punktwolke getestet. Insgesamt wurden 32 unterschiedliche Kombinationen miteinander verglichen und mit den für den Kanton Appenzell Ausserrhoden vorhandenen Daten des Landesforstinventars (LFI) an 27 Standorten evaluiert. In unserer Analyse hat sich der Algorithmus von Dalponte & Coomes (2016) in Kombination mit dem «spike-free» VHM mit einer Auflösung von 0.5m als derjenige Ansatz mit der höchsten Detektionsrate im Vergleich zu den LFI Flächen herausgestellt. Betrachtet man den F-Score als Gütemass für die Genauigkeit der Klassifikation beträgt dieser 0.6 ± 0.13 (arithmetisches Mittel $\pm$ Standardabweichung). Bei dem Algorithmus von Dalponte & Coomes (2016) wird die Oberfläche des VHM zunächst mit einem Tiefpassfilter geglättet, um die Anzahl der Spitzen und Vertiefungen zu reduzieren. Im Anschluss werden lokale Maxima innerhalb eines «moving windows» erkannt. Die Größe des beweglichen Fensters passt sich innerhalb eines vordefinierten Intervalls auf der Grundlage des Pixelwerts (d.h. anhand des Wertes der Höhe im VHM) der Fokuszelle an. Es resultieren die Koordinaten (x,y) sowie die Höhe (z) aus dem VHM.

Entwicklungsstufe

Die Entwicklungsstufe wurde auf Basis der Einzelbäume abgeleitet. Zu jedem Einzelbaum wird die Höhe aus dem VHM bestimmt (siehe oben). Dazu wurde der Zusammenhang von $BHD = \frac{H^{1.25}}{100}$ angenommen (Dorren 2017), wobei BHD [cm] der Baumdurchmesser auf Bruthöhe und H [m] die abgeleitete Höhe des jeweiligen Baumes ist.

Deckungsgrad

Der Deckungsgrad wurde auf Basis des «spike-free» VHM mit einer Auflösung von 0.5m berechnet. Dazu wurden alle Werte unter 3m aus dem VHM entfernt; es resultiert ein binärer Layer (unter 3m Höhe / über 3m Höhe). Die Pixel über 3m sind «bedeckte» Fläche, welche als Deckungsgrad für eine 10 x 10m grosse Fläche prozentual ausgedrückt wird.

Schichtung

Zur Berechnung der Schichtung wurde erneut auf die normalisierte Punktwolke zurückgegriffen. Die Verteilung der Punktwolke resp. der vertikalen Punktdichte ist dabei ausschlaggebend. Dabei werden jeweils alle Punkte innerhalb der LFI Waldmaske und einer Fläche von 5 x 5 m (Pixelgrösse) betrachtet. Der höchste Wert innerhalb des Pixels definiert die Oberhöhe (LFI4; Brändli *et al.* 2020). Entsprechend werden innerhalb des Pixels die Grenzwerte für Oberschicht OS ($> \frac{2}{3}$ der Oberhöhe), Mittelschicht MS ($\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ der Oberhöhe) und Unterschicht US ($< \frac{1}{3}$ der Oberhöhe) festgelegt (LFI4; Brändli *et al.* 2020). Aus allen Punkten innerhalb des Pixels wird die vertikale Dichteverteilung mit Hilfe eines Kerndichteschätzers (Gausskern, Bandweite = 4) abgeleitet. Es wird überprüft wie viele Spitzenwerte («peaks») die Dichteverteilung aufweist. Liegt einer der «peaks» innerhalb der Bereiche von MS und/oder OS und/oder US wird zunächst von einer möglichen Schicht ausgegangen. In einem letzten Schritt wird

überprüft, wieviel Prozent der Punkte innerhalb der potentiellen Schicht liegen. Wird dabei ein Schwellenwert von 5% überschritten, wird definitiv eine Schicht angenommen. Es resultiert ein binärer Layer mit den Werten «einschichtig» und «mehrschichtig».

Mischungsgrad

Beim Mischungsgrad greifen wir auf den Waldmischungsgrad des LFI zurück (Waser *et al.* 2021). Der Waldmischungsgrad wird auf Basis von Satellitendaten (Sentinel-1 und Sentinel-2), digitalen Geländemodellen «[swissALTI3D](#)» und der LFI Waldmaske erstellt und gibt die Nadelholzwahrscheinlichkeit pro Pixel (10x10m) wieder.

Web-Applikation auf «maps.wsl.ch»

Im Rahmen des NFP68 Projekts «[SOSTANAH](#)» (Graf *et al.* 2017) wurde im Hinblick auf eine praxistaugliche Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Unterstützung eines nachhaltigen Wald-Managements, namentlich zur Förderung von Schutzfunktionen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen, das Konzept der «Interaktiven Karten» entwickelt.

Mit dem Nachfolgeprojekt «Schützen gut strukturierte Wälder besser» (WHFF-CH) ist dieser Ansatz auf Basis des Bestandescodes in Form einer Web-Applikation verwirklicht worden. Schritt für Schritt konnte gezeigt werden, dass die Waldstruktur einen erheblichen Anteil an der erfolgreichen Stabilisierung steiler Hänge ausübt. Ferner war es möglich über die einfach zu erhebenden Parameter des Bestandescodes auch den bodenmechanischen Aspekt zu integrieren, insbesondere betreffend Scherparameter und Hangneigung. Der Bestandscode wird in der Forstpraxis allseits verwendet, um Waldbestände aufgrund ihrer Struktur (Waldmischungsgrad, Entwicklungsstufe, Deckungsgrad und Schichtung) zu charakterisieren. Seit Kurzem sind nun interaktive Karten für den Kanton Appenzell Ausserrhoden «on air» und stellen die räumlichen Daten kartographisch, interaktiv, agil und dynamisch dar. Unter «[maps.wsl.ch](#)» steht, neben anderen Anwendungen, dieses Produkt als Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» zur Verfügung (Abb. 5).

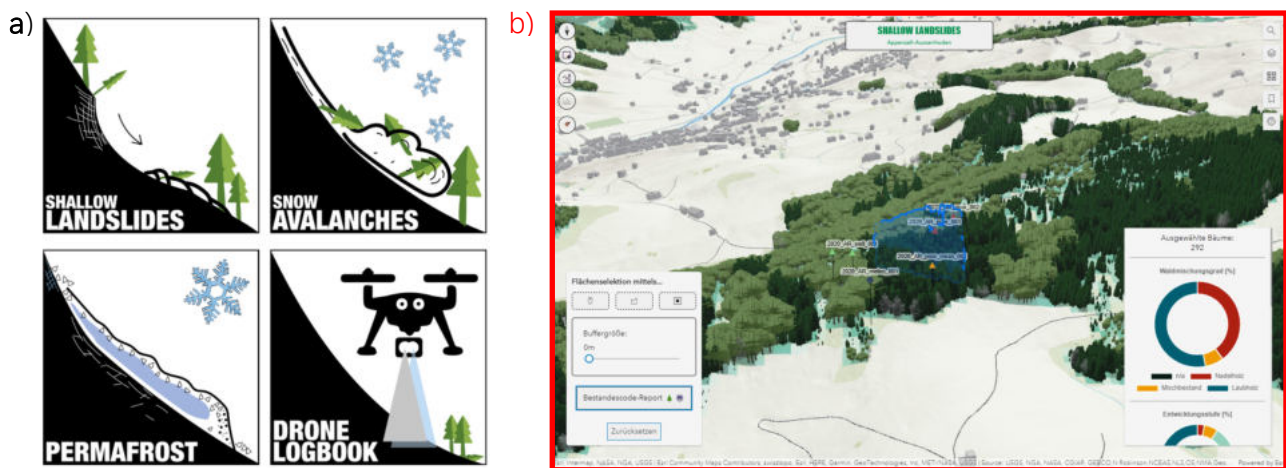


Abbildung 5: a) Web-Applikation «maps.wsl.ch»: Kartographische Umsetzungs-Plattform für wissenschaftliche Ergebnisse im Hinblick auf deren benutzerfreundliche und praxistaugliche Anwendung.

b) **SHALLOW LANDSLIDES**: «Interaktive Karten» zum Einfluss der Waldstruktur auf das Schuttpotential vor flachgründigen Rutschungen im Kanton Appenzell Ausserrhoden.

Rahmenbedingungen

Im Hinblick auf eine moderne Umsetzung der komplexen, wissenschaftlichen Thematik in der Form einer kartographischen Web-Applikation (Roth *et al.* 2021) wurden vorab sowohl die spezifischen Rahmenbedingungen (z.B. programmiertechnischer Ansatz, unterstützte Endgeräte, eventuelle Lizenzen etc.) geklärt, als auch die Zielgruppe, die Visualisierungsform und die gewünschten Funktionalitäten (bestenfalls mit Ausbaupotential) definiert. Mit einem Fokus auf die späteren Benutzer der Applikation sind bereits in den Anfängen des Projektes die «Stakeholder» miteinbezogen und detaillierte Absprachen im Hinblick auf das Endprodukt vorgenommen worden (Retchless *et al.* 2021). Auf dieser Basis wurde dann die entsprechende Richtung gewählt und das Projekt - begleitet von mehreren Feedbackrunden – stückweise umgesetzt.

Vorteile einer Web-Applikation

Eine Web-Applikation bietet im Vergleich zur Software-Lösung einige Vorteile (KCS 2021). Da sie ohne Installation auskommt und im Idealfall über jeden gängigen Browser abgerufen werden kann, ist diese flexibel und ohne größeren Aufwand des Benutzers über einen Link zugänglich. Auf diese Weise können viele Anwender gleichzeitig angesprochen und auch neue Versionen der Web-Karte ohne Verzögerung direkt via demselben Link bereitgestellt werden. Darüber hinaus profitiert die Webentwicklung von einer großen und bestens vernetzten Community (zur Problemfindung, Diskussion etc.) sowie frei zugänglicher sog. Code-«Libraries», welche verschiedenartige Funktionalitäten beinhalten und beliebig verwendet sowie modifiziert werden können.

«maps.wsl.ch»

Alle derzeit verfügbaren Web-Applikationen auf [«maps.wsl.ch»](https://maps.wsl.ch) bestehen aus mehreren Web-Komponenten. Die Grundlage stellt die lizenzpflichtige WebGIS-Plattform «ArcGIS Online» (ESRI 2022a) von ESRI dar, eines US-amerikanischen Softwareherstellers von Geoinformationssystemen. Über «ArcGIS Online» werden die in der späteren Webkarte enthaltenen räumlichen Daten verwaltet und für die Verwendung bereitgestellt. Mithilfe der «ArcGIS API for JavaScript» (ESRI 2022b) – einer Programmierschnittstelle – werden dann die Karten erzeugt und (fast) beliebig manipuliert. Die funktionalen Bausteine (sog. «Widgets» wie z.B. das Bestandescodeanalyse-Tool) sind mit HTML, CSS und JavaScript eigens geschriebene Programmbestandteile, die für die einzelnen Web-Projekte am SLF entwickelt wurden. Die spätere Interaktivität und dynamischen Visualisierungen in der Web-Applikation sind das Ergebnis eines sensiblen Zusammenspiels aus Server und Programmcode, das eine regelmässige Wartung durch geschultes Personal erfordert. Auch Web-Browser unterliegen ständigen Veränderungen und müssen deshalb bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Ergänzt werden die [«maps.wsl.ch»](https://maps.wsl.ch)-Applikationen momentan durch die frei zugänglichen JavaScript-Bibliotheken «Chart.js» (Statistische Diagramme) und «webpack» (Web-Funktionalitäten).

Für «[SHALLOW LANDSLIDES](https://shallow-landslides.ch)» braucht man als Benutzer bevorzugt eine aktuelle Version der Web-Browser Google «Chrome» oder Microsoft «Edge». Die aktuelle Version (Juni 2022) wurde für einen PC bzw. Laptop in horizontaler Ausrichtung («landscape») und mittlerer Hardwareausstattung entwickelt.

Diskussion, Folgerungen

Bodentyp

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem NFP68-Projekt «[SOSTANAH](#)», namentlich im Rahmen der Entwicklung des «[3-Stufen-Filters](#)» zur retrospektiven Erklärung flachgründiger Rutschungen, kann deren Auslösungswahrscheinlichkeit mit Hilfe von Hangneigung (α), Scherparametern (Reibungswinkel Φ' , Kohäsion c') sowie dem Bestandescode (Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung, Deckungsgrad) und der Topographie (Morphotypen) zum grössten Teil (>90%) nachvollziehbar und schlüssig erklärt werden (Graf *et al.* 2017).

Diese Charakterisierung der Prädisposition hinsichtlich Gefährdung der Auslösung flachgründiger Rutschungen konnte im Rahmen unseres WHFF-CH Projekts «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» bestätigt werden. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus den entsprechenden Analysen betrifft das Bodenmaterial. Von den untersuchten Rutschungen (n=32) des Unwetters von 2002 in Appenzell fanden nur zwei (~6%) in sogenannten «Reibungsböden» statt. In 29 Fällen (~90%) war Bodenmaterial betroffen, dessen Festigkeit (vorwiegend) durch die Saugspannung dominiert wird – eine Rutschung (~3%) konnte dem «intermediären» Bodentyp zugeordnet werden (Tab. 2; USCS-Klassifikation).

Die Dominanz des «Saugspannungs-Bodentyps» widerspiegelt sich auch in den Ereignissen von Sachseln (1997; n=109) mit einem Anteil von 67% (intermediär: 33%) und St. Antönien (2005; n=23) mit einem solchen von 74% (intermediär: 22%). Dieser Befund hat weitreichende Konsequenzen im Rahmen der Auslösung flachgründiger Rutschungen, was namentlich der Tatsache geschuldet ist, dass die überwiegende Mehrheit flachgründiger Rutschungen im Rahmen von Niederschlagsereignissen stattfindet, seien sie länger anhaltend und eher moderat oder kurzzeitig und sehr intensiv (Rickli *et al.* 2019). Entsprechend nehmen Bodenhydrologie und damit gekoppelt die Saugspannung eine zentrale Stellung ein. Diese Bewandnis wird durch die Multi Faktor Analyse bestätigt, insbesondere unter ausschliesslicher Berücksichtigung des Bodentyps «Saugspannung», dessen Festigkeit massgeblich von der Saugspannung beeinflusst ist (Abb. 6; siehe auch Teil «Quantitative (numerische) Faktoren» S. 13-14.

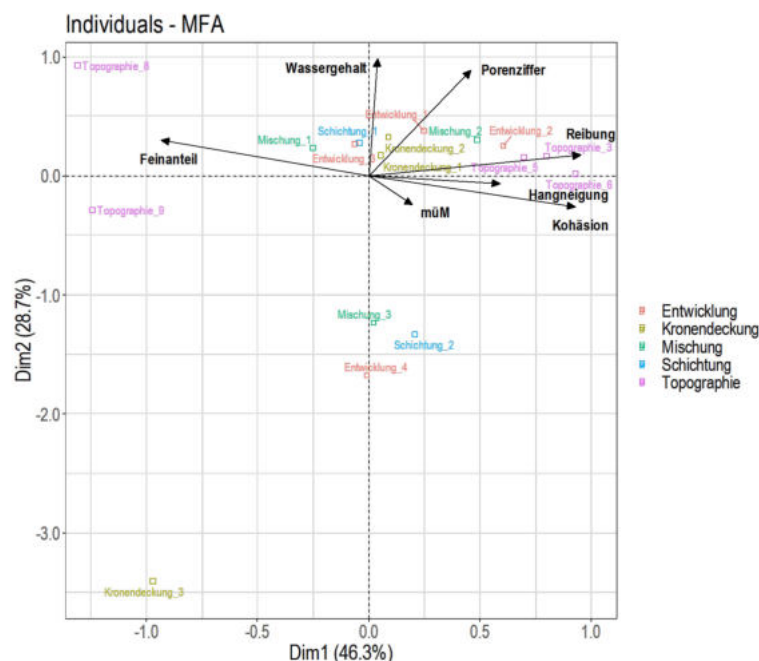


Abbildung 6: Multi Faktor Analyse (MFA) mit erster (Dim1) und zweiter (Dim2) Hauptkomponente der flachgründigen Rutschungen des Bodentyps «Saugspannung» von Appenzell 2002.

Numerische Variablen: Höhenlage, Hangneigung α ; Feinanteil f_c , Reibungswinkel Φ' , Wassergehalt w , Kohäsion c' , Porenziffer e

Kategorielle Variablen: Entwicklungsstufe, Mischung, Schichtung, Deckungsgrad; Topographie.

Struktur und Stabilität der Bodenmatrix und somit des Porenraums sind einerseits massgeblich für die Stabilität von Hängen verantwortlich und bekleiden andererseits im Zusammenhang mit dem Auslö-

sungsmechanismus flachgründiger Rutschungen eine Schlüsselrolle, insbesondere was die Auswirkungen der Prozesse Infiltration, Speicherung und Drainage betrifft. Diese wiederum sind ausschlaggebend für die Regulierung des Porenwasserdrucks, welcher mit zunehmender Wassersättigung ansteigt und nach überschreiten eines Schwellenwertes zum Versagen der Struktur und damit zum Abgleiten des Bodenkörpers führt (Boogard & Greco 2016).

Vegetationseffekte

Es ist hinlänglich bekannt, dass Vegetation und namentlich Wälder den Wasserhaushalt generell und die Bodenhydrologie im Besonderen entscheidend beeinflussen. Dank Interzeption durch das Kronendach können bis zu 40% des Niederschlags zurückgehalten werden (Loshali & Sing 1992, Hörmann *et al.* 1996, Park 2000, Price & Carlyle-Moses 2003, Deguchi *et al.* 2006). Zudem wird in Abhängigkeit von Durchwurzelung und Deckungsgrad dem Boden durch (Evapo-)Transpirationsprozesse Wasser entzogen. Eng damit verbunden ist in dieser Hinsicht die hydraulische Konduktivität, welche für den Wassertransport von tieferliegenden, feuchten Schichten zu trockeneren nahe der Bodenoberfläche mitverantwortlich ist (Queretjeta *et al.* 2008, Bauerele *et al.* 2008).

Eine wirkungsvolle und kontinuierliche Bodenentwässerung wirkt sich über den Quellungs- und Schrumpfungsprozess positiv auf die Stabilität des Bodengefüges, insbesondere die Sekundärporen aus. Damit einhergehend kommt es zu einem bedeutenden Anstieg der Saugspannung, was wiederum die Boden- und Hangstabilität erhöht (Yildiz *et al.* 2019 a, b).

Unterschiede in der Wurzelstruktur und -architektur sowie der Durchwurzelungsintensität haben einen massgebenden Einfluss auf die Widerstandskraft gegen zunehmenden Porenwasserdruck. Analysen von Ng *et al.* (2015) haben gezeigt, dass die Wurzelmorphologie die Widerstandskraft gegen zunehmenden Porenwasserdruck massgeblich beeinflusst. In der Reihenfolge mit abnehmendem Einfluss sind das die Wurzelformen «exponentiell», «dreieckig», «uniform» und «parabolisch». Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass mit zunehmender Intensität der Durchwurzelung die Zeitdauer bis zum Zerfall des Bodenkörpers aufgrund ansteigenden Porenwasserdrucks verlängert wird und der aufgebaute Widerstand positiv mit der Aggregatstabilität korreliert (Bader 2014). Diese wiederum wird insbesondere durch den Armierungseffekt der Wurzeln sowie die chemisch-biologische Zementierung mittels Stoffwechselprodukten und gemeinsam mit Symbiosepartnern, insbesondere Mykorrhizapilzen gesteuert (Graf & Frei 2013).

Eine hohe Diversität an Pflanzen und damit verknüpft ihrer Pilzpartner und Wurzelmorphologie, erhöht nicht nur die Stabilität des Bodengefüges, sondern fördert ebenso eine nachhaltige Rückhaltekapazität von Wasser und Nährstoffen, was wiederum eine essentielle Voraussetzung für Wachstum und Entwicklung der Vegetation ist. Eine höhere Vielfalt an Wurzeln trägt zudem zu einer wirkungsvollen und kontinuierlichen Bodenentwässerung bei. Dadurch wird das Fassungsvermögen der Poren während Trockenperioden kontinuierlich und massgeblich erhöht. Während einem Unwetterereignis kann somit über eine längere Zeitspanne die Wassersättigung verzögert oder gar verhindert und der Auslösung flachgründiger Rutschungen entscheidend entgegengewirkt werden (Graf *et al.* 2017).

Bestandescode

Wie bereits die Anwendung des «[3-Stufen-Filters](#)» gezeigt hat, besitzt der Bestandescode mit seinen vier Parametern beachtliches Potential im Hinblick auf die Charakterisierung rutschungsgefährdeter Hänge. Gekoppelt mit bodenmechanischen Eigenschaften, Hangneigung und Topographie, konnten von über 200 untersuchten Rutschungen der Ereignisse in Sachseln (1997), Napf und Appenzell (2002) sowie Entlebuch, Napf und Prättigau (2005) über 95% retrospektiv erklärt werden (Graf *et al.* 2017). Basierend auf Auswertungen der bodenmechanischen sowie Bestandescode-Parametern für die Rutschungen der Ereignisse von Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005), konnten wir einen Grenzneigungswinkel definieren $\alpha_{lim}=35^\circ$, unterhalb welchem die Eintretenswahrscheinlichkeit von flachgründigen Rutschungen in gut strukturierten Wäldern mit $P \leq 5\%$ äusserst gering ist (Abb. 1, Tab. 3; Graf *et al.* 2017, Graf & Grunder 2017). Im Falle von Appenzell war dies nur für eine Rutschung

der Fall (~3%; n=32), wobei für diese der Hangneigungswinkel α exakt dem Grenzwert ($\alpha_{lim}=35^\circ$) entsprach und sie seitens Morphotyp (Topographie) im stark betroffenen Typ 6 registriert wurde (Anhang 1).

In dieser Analyse wurden alle betroffenen Bodentypen nach USCS-Klassifikation (SN670010b 2011) berücksichtigt. In der weiteren Anwendung des vorgeschlagenen Grenzneigungswinkels $\alpha_{lim}=35^\circ$ kann somit die Charakterisierung von Waldbeständen hinsichtlich ihrer Gefährdung durch flachgründige Rutschungen unabhängig der geotechnischen Eigenschaften des Bodens vorgenommen werden. Diese beträchtliche Vereinfachung ermöglicht eine flächendeckende Beurteilung von Waldbeständen ausschliesslich basiert auf dem Bestandscode mittels Fernerkundung, vorausgesetzt es liegen aktuelle und hochaufgelöste Terrain- und Vegetations-Höhenmodelle vor – für die geotechnischen Parameter ist dies nicht der Fall.

Was die aktuell von uns vorgeschlagenen Schwellenwerte der Bestandscode-Parameter für eine gute Waldstruktur hinsichtlich dem Schutz vor flachgründigen Rutschungen betrifft, sollte ein Bestand mindestens zweischichtig sein. In Abhängigkeit der Höhenstufe sollte der Deckungsgrad Werte von mehr als (40%) 60% und weniger als 80% (90%) aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der subalpinen Stufe auch ein minimaler Deckungsgrad von 40% ausreichend sein kann, falls der Gesamtdeckungsgrad (gesamte Vegetation) $\geq 80\%$ beträgt. Ein sehr hoher Deckungsgrad ($>80\%$), kann sich jedoch insofern negativ auf den Schutz vor flachgründigen Rutschungen auswirken, falls er im Zusammenhang mit einschichtigen, gedrängten Beständen steht, was insbesondere die natürliche Verjüngung und den Bodenwasserhaushalt beeinträchtigt. Der Nadelholzanteil sollte kleiner als 80% sein, wobei auch bei der Beurteilung der Mischung die Höhenstufe einen massgeblichen Einfluss hat. Allerdings sollte nicht nur der Laubholzanteil möglichst hoch sein, sondern generell auch die Artenvielfalt. Diese spielt im Zusammenhang mit der Bodenentwässerung über (Evapo-)Transpiration und hydraulische Konduktivität eine Schlüsselrolle, namentlich was die Stabilität des überwiegend betroffenen Bodentyps «Saugspannung» betrifft. Hinsichtlich der Entwicklungsstufe «Jungwuchs» haben wir nach wie vor keine ausreichende Datengrundlage und entsprechend liegt der Schwellenwert bei der Faktorstufe «Stangenholz». Unabhängig davon sollten jedoch im Sinne der sogenannten «[3D-Diversität](#)» (Abb. 7) wo immer möglich mehrere Entwicklungsstufen parallel im gleichen Bestand vertreten sein.

Basierend auf diesen Schwellenwerten (Tab. 1), habe wir für den Kanton Appenzell Ausserrhoden eine erste «Interaktive Karte» erstellt, welche über unsere Umsetzungs-Plattform «maps.wsl.ch» zugänglich ist.

Web-Applikation «SHALLOW LANDSLIDES»

Die Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» für den Kanton Appenzell ermöglicht es die vorhergehend erläuterten, komplexen Zusammenhänge im Rahmen des Schutzpotentials von Waldbeständen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen auf einfache Art und Weise für ein nachhaltiges Waldmanagement anzuwenden, mit der Möglichkeit der Priorisierung von Pflegeeingriffen. Neben der Hangneigung können die vier Parameter des Bestandscodes eingeblendet werden, differenziert nach den in Tabelle 1 aufgeführten Faktorstufen. Als Ergänzung stehen zudem zwei Feuchte-Indices (TWI: Topographic Wetness Index) zur Verfügung – ungewichtet und mit dem Sommerniederschlag gewichtet. Zudem können beliebige Höhenprofile angelegt und somit Informationen zur Topographie (Morphotypen) gewonnen werden. Eine kurze Anleitung und Erklärungen zu den wichtigsten Funktionen befinden sich im Anhang B.

Die verwendete Waldmaske basiert auf dem Vegetationshöhenmodell aus dem Jahre 2018. Dank der Einzelbaumerkennung (Dalponte *et al.* 2018) sind jedem einzelnen Baum dessen Höhe und Brusthöhendurchmesser (BHD) sowie die zugehörigen Werte der Bestandscode-Parameter zugeordnet. Zur Beurteilung der Gefährdung durch flachgründige Rutschungen können beliebige oder vordefinierte Flächen ausgewählt und für diese Analysen durchgeführt werden. Die entsprechenden Resultate werden graphisch dargestellt und können als zweiseitige Bestandscode-Reports im pdf-Format gespeichert werden. Für die im Anhang 1 markierten Rutschungen (Nr. 274, 276, 281, 297) wurde dies exemplarisch durchgeführt (Anhang B). In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Rutschungen im Jahre 2002 ausgelöst wurden und das aktuelle Vegetationshöhenmodell die Situation von 2018 darstellt, also 16 Jahre nach dem Ereignis. Somit repräsentieren die Auswertungen der vier Bestandscode-Parameter die Verhältnisse nach einer gut 15-jährigen Entwicklung.

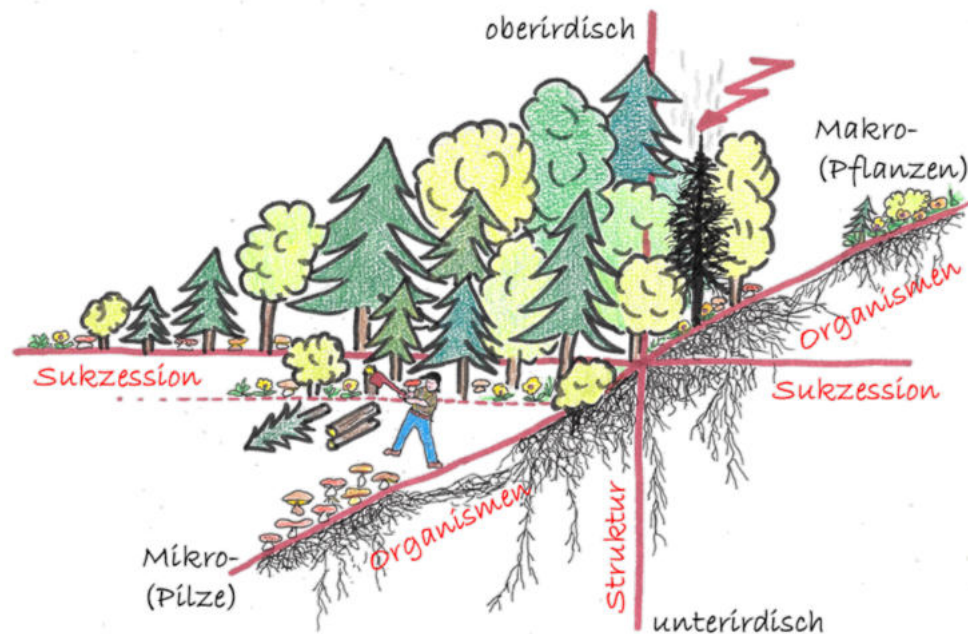


Abbildung 7: 3^D-Diversität unter Berücksichtigung von Mikro- und Makro-Organismen (Pflanzen- und Mykorrhizapilz-Arten), ober- und unterirdischer Struktur sowie Sukzession und deren Regulierung durch anthropogene Eingriffe (Pflege und Unterhalt) und natürliche Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer, Feuer, und Lawinen (Zeichnung von V. Graf-Morgen, 2016).

Ausblick

Dass flachgründige Rutschungen insbesondere in Bodenmaterial ausgelöst wurden, dessen Festigkeit vornehmlich durch die Saugspannung beeinflusst wird, unterstreicht die substantielle Rolle der Bodenhydrologie per se und damit den Einfluss der Pflanzen darauf, namentlich durch (Evapo-)Transpiration sowie hydraulische Konduktivität. Erstere fördert über «Quellung und Schrumpfung» massgeblich die Boden- und damit die Hangstabilität.

Entsprechend könnte die Verknüpfung unterschiedlicher Waldgesellschaften und deren Struktur basierend auf dem Bestandescode mit (Evapo-)Transpirationsraten sowie dem Topographischen Feuchte-Index (TWI) die Güte des Zusammenhangs von Waldstruktur und Schutzpotential vor flachgründigen Rutschungen weiter erhöhen (Simmler 2020).

Fazit

Die vertieften Analysen der Rutschungen von Appenzell (2002) sowie der Vergleich mit den Informationen der Ereignisse in Sachseln (1997) und St. Antönien (2005) hinsichtlich Bestandscode-Parameter weisen darauf hin, dass diese eine einfache und zielführende Beurteilung des Gefährdungspotentials durch flachgründige Rutschungen ermöglichen.

Auch wenn die Datengrundlage in gewissem Masse eingeschränkt war, kann die Kernfrage des Projekts «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» auf solidem Fundament bejaht werden.

Unter Berücksichtigung der von uns vorgeschlagenen Schwellenwerte zeichnen sich für die Diskriminierung namentlich Schichtung und Mischung aus. Dem Deckungsgrad ist ebenfalls Aufmerksamkeit zu schenken, nicht zuletzt auch im Zusammenhang mit Lückenlängen. In einem Wald für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen sollten diese nicht zu gross sind, da in vegetationsfreiem oder nur spärlich bedecktem Boden der positive Effekt der (Evapo-)Transpiration auf die Saugspannung und Stabilität des Bodengefüges stark reduziert ist (Kapitel «Waldstruktur, Topographie und Bodenmechanik» S. 6; Moos *et al.* 2016). Was die Entwicklungsstufe betrifft, beschränkt sich aktuell die Empfehlung auf das Nebeneinander verschiedener Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung zu fördern. Dabei sollten sowohl die spezifischen Standortbedingungen als auch die Bestandesgeschichte miteinbezogen werden. Für ausgewählte Gebiete kann die aktive Erhaltung einer bestimmten Sukzessionsphase im Hinblick auf Bodenstabilität zielführender sein, z.B. in vernässten Bereichen ein Entwicklungsstadium mit möglichst hohem (Evapo-)Transpirationspotential. Die Stabilität gegen Abgleiten des Bodenmaterials der flachgründigen Rutschungen, die während des Unwetters 2002 im Untersuchungssperimeter von Appenzell Ausserrhoden ausgelöst wurden, war in gut 90% der Fälle (n=29) durch Saugspannung dominiert⁵. Auf ausgesprochene Reibungsböden fielen zwei Ereignisse und eine Rutschung wurde in intermediärem Bodenmaterial registriert (Tab. 1). Werden die drei Ereignisse Sachseln (1997), Appenzell (2002) und St. Antönien (2005) gemeinsam betrachtet, fanden gut 90% der dokumentierten flachgründigen Rutschungen in Böden statt, deren Stabilität (vorwiegend) durch die Saugspannung beeinflusst wird. Im Hinblick auf die Scherparameter ist somit die Kohäsion c' entsprechend ausgeprägt und relevant. Der Anteil an reinen Reibungsböden, bei welchen für die Sicherheit gegen Abgleiten insbesondere der Reibungswinkel Φ' massgebend ist, beläuft sich auf <2%. (Tab. 1; Abb. 1).

Aufgrund dieser Tatsache kommt dem Einfluss der Pflanzen auf den Wasserhaushalt und insbesondere die Bodenhydrologie eine entscheidende Rolle zuteil und damit namentlich der (Evapo-)Transpiration und hydraulischen Konduktivität.

Es ist zwar allgemein bekannt, dass laubabwerfende Bäume während der Vegetationsruhe weniger transpirieren als Nadelgehölze und immergrüne Bäume. Es hat sich jedoch gezeigt, dass namentlich zu Beginn und während der Schneeschmelze insbesondere früh austreibende Laubhölzer bis zu 25% des zur Verfügung stehenden Schmelzwassers aufnehmen können und somit einen massgeblichen Beitrag zur Bodenentwässerung leisten. Damit einhergehend kommt es zu einem bedeutenden Anstieg der Saugspannung, was wiederum die Boden- und Hangstabilität erhöht (Yildiz *et al.* 2019). In einem gut strukturierten Wald für «optimalen» Schutz vor flachgründigen Rutschungen ist somit eine hohe Vielfalt nicht nur bezüglich Arten, sondern auch hinsichtlich deren Phänologie wichtig.

Die Web-Applikation «[SHALLOW LANDSLIDES](#)» ermöglicht einen einfachen Zugriff sowie die praxistaugliche Anwendung der vorerst auf den Kanton Appenzell Ausserrhoden beschränkten interaktiven Karte, um das Schutzpotential von Waldbeständen zur Verhinderung flachgründiger Rutschungen auf einfache Art und Weise abzuschätzen. Basierend auf dem Bestandscode unterstützt dieses Instrument die Planung eines nachhaltigen Waldmanagements, mit der Möglichkeit der Priorisierung von Pflegeeingriffen.

Im Hinblick auf eine nachhaltige Schutzfunktion vor flachgründigen Rutschungen sollten Eingriffe wo immer möglich, das Nebeneinander verschiedener **Sukzessions- und Entwicklungsstufen in kleinräumig ausgewogener Verteilung** fördern. Dabei spielen neben Höhenlage, Exposition, Topographie, Bodenwasserhaushalt und Neigung insbesondere auch die Waldgesellschaft (Sukzessionsstadium, Artenzusammensetzung, Verjüngung) sowie (mikro-)klimatische Faktoren und Klimaveränderung eine massgebliche Rolle, wie dies teilweise einerseits im NaiS-Profil «Rutschungen, Erosion, Murgänge» (Frehner *et al.* 2005) und für die Rotten- und Jungwaldpflege (Gruppenplenterung) im Gebirgs- und

⁵ Die Boden-Klassifikation fand nur stichprobenhaft mit exakten Labormethoden statt. Grösstenteils wurde diese gutachtlich im Felde durchgeführt. Entsprechend können gewisse Fehlzuordnungen nicht ausgeschlossen werden.

Schutzwald empfohlen wird (Glanzmann *et al.* 2019; [Praxishilfe für die Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald](#)). Vorteilhaft sind schlitzförmige Öffnungen mit situationsbedingten Lückenlängen von ca. 15-50m oder in Abhängigkeit der Waldgesellschaft mit ½- bis 1½-facher Baumlänge. Durch diese **«dreidimensionale Diversität»** (Abb. 7) – oberirdisch, unterirdisch und hinsichtlich Sukzession (zeitliche Diversität) – erhöht sich nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Widerstandskraft des gesamten Bestandes. Auch dessen Selbstregulierung wird so massgeblich gefördert. Entsprechende Schutzwälder weisen demzufolge eine gebührende **ober- und unterirdische Vielfalt** auf, insbesondere bezüglich Arten, Alter, horizontaler und vertikaler Struktur, Baumartenmischung sowie Durchwurzelung und Wurzelarchitektur.

Verdankungen

Unser Projekt 2017.19 «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser» wurde von der Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH) finanziert und in verdankenswerter Weise von Werner Riegger und Claire-Lise Suter begleitet.

Unser Dank gebührt insbesondere auch den Jüngsten im Bunde, namentlich Jonas Alsleben, Liv Fritsche, Jens Furrer, Till Groh, Nuno Käch, Thomas Planzer und Kevin Simmler, die im Rahmen von Praktika, Masterarbeiten und Zivildienst unsere Arbeiten tatkräftig unterstützt und wertvolle Beiträge zum Gelingen beigesteuert haben.

Literaturverzeichnis

- Ackermann J, Adler P, Aufreiter C *et al.* (2020) Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendung – Leitfaden AFL 2020. WSL Bericht 87, 60 S.
https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A22425/datastream/PDF/Ackermann-2020-Oberflächenmodelle_aus_Luftbil-dem_für_forstliche-%28published_version%29.pdf
- Aston AR (1979) Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology* 42: 383-396.
- Bader A 2014: How Plants and Mycorrhizal Fungi Contribute to Soil Aggregate Stability. Master Thesis ETH, 146 pp. https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Projekte/SOSTANH/AnjaBader.pdf
- Badoux A, Andres N, Techel F, Hegg C (2016) Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Science*, 16: 2747-2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>
- BAFU, Bundesamt für Umwelt, Hrsg. (2008) Handbuch NFA im Umweltbereich. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Umwelt-Vollzug Nr. 0808. Bundesamt für Umwelt, Bern, 283 S.
- Bauerle TL, Richards JH, Smart DR, Eissenstat DM (2008) Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. *Plant Cell Environ.* 31: 177–186.
- Bebi P, Bast A, Ginzler C, Rickli C, Schöngunder K, Graf F (2019) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse, Schweiz. Z. Forstwes. 170: 318–325.
- Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin. *Hydrological Sciences Bulletin* 24: 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bezzola GR, Hegg C, Ed. (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 215 S.
- Bezzola GR, Hegg C Ed (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825, 429 S.
- Boogard TA, Greco R (2016) Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure. *WIREs Water*, 3: 439–459. [doi: 10.1002/wat2.1126](https://doi.org/10.1002/wat2.1126).
- Brändli UB, Abegg M, Allgäier Leuch B, Red. (2020) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, 341 S. https://www.lfi.ch/publikationen/publ/ergebnisberichte/LFI4_Ergebnisbericht.pdf
- Brönnimann S, Rajczak J, Fischer EM, Raible CC, Rohrer M, Schär C (2018) Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18: 2047–2056. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2047-2018>
- Chart.js (2022) Simple yet flexible JavaScript charting for designers & developers. <https://www.chartjs.org/> (aufgerufen am 10.05.2022)
- Dalponte M, Coomes DA (2016) Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution* 7: 1236-1245. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575>
- Dalponte M, Reyes F, Kandaare K, Gianelle D (2018) Delineation of Individual Tree Crowns from ALS and Hyperspectral data: a comparison among four methods. *European Journal of Remote Sensing* 48: 365-382. doi: 10.5721/EuJRS20154821
- Deguchi A, Hattori, Park HT (2006) The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *J. Hydrol.* 318: 80–102.
- Demontzey P (1878) Etude sur les travaux de reboisement et de gazonement des montagnes. Imprimerie Nationale, Paris, 421 S.
- Dooren L (2017) FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ paper, 5 pp. https://www.ecorisq.org/docs/FINT_manual_EN.pdf
- Duile J (1826) Über Verbauung der Wildbäche in Gebirgs-Ländern, vorzüglich in der Provinz Tirol und Vorarlberg: zum Gebrauche für Bau- und Forstbeamte, Obrigkeiten, Seelsorger und Gemeinds-Vorstände. Innsbruck, 180 S.
- ESRI (2022a) Connect people, locations, and data using interactive maps. <https://www.arcgis.com> (aufgerufen am 10.05.2022)
- ESRI (2022b) Unlock your data's potential with interactive user experiences and stunning 2D and 3D visualizations. <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/> (aufgerufen am 10.05.2022)
- Frehner M, Wasser B, Schwitter R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Gariano S, Guzzetti F (2016) Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews* 162: 227-252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2016.08.011>
- Ginzler C, Hobi ML (2016) Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 167: 128-135. <https://doi.org/10.3188/szf.2016.0128>
- Glanzmann L, Schwitter R, Zürcher S (2019) Jungwaldpflege im Gebirgs- und Schutzwald. *Wald und Holz* 9: 22-25. https://www.gebirgs-wald.ch/tl_files/gebirgswald/de/05_Wald_u_Holz/Jungwaldpflege/1909_Jungwaldpflege.pdf
- Graf F, Bast A, Rickli C, Bebi P (2020) Schutz-Wald-Struktur: Einfluss auf flachgründige Rutschungen. *Mitteilungsblatt Ingenieurbiologie* 3: 14-20.
- Graf F, Bebi P, Braschler U, *et al.* (2017) Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. WSL Berichte, 56. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 42 S.
- Graf F, Frei M (2013) Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l. *Ecol. Eng.* 57, 314–323.
- Graf F, Frei M, Böll A (2009) Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *FOSNOLA* 82, 61-78.
- Graf F, Grunder K (2017) Shallow landslides: lessons from Sachseln 1997. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 19, EGU General Assembly 2017. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-2719.pdf> / http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/poster_egu17_graf_grunder.pdf
- Goulas K, Graf F (2003) Lebendverbau in Wildbacheinzugsgebieten Griechenlands. *Ing.biol.* 4: 19-25.
- Husson F, Lê S, Pagès J (2017) Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R. Chapman & Hakk/CRC, Computer Science and Data Analysis Series, pp. 248.
- Kaiser M (1967) Die Bouchser Rübi. *Schweiz. Z. Forstwes.* 8: 493-522.
- KCS (2021) The benefits of web applications in today's technological era. <https://www.kcsitglobal.com/blogs/detail-blog/the-benefits-of-web-applications-in-todays-technological-era> (aufgerufen am 10.05.2022)
- Khosravipour A, Skidmore AK, Isenburg M, Wang T, Hussin YA (2014) Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 9: 863-872. doi: 10.14358/PERS.80.9.863

- Khosravipour A, Skidmore AK, Isenburg M (2016) Generating spike-free digital surface models using LiDAR raw point clouds: a new approach for forestry applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (JAG)* 52: 104-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.005>
- Landolt E (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen. J.A. Weingart, Bern, 367 S.
- Liu S (1997) A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling* 99: 151–159.
- Loshali DC, Singh RP (1992) Partitioning of rainfall by three Central Himalayan forests. *Forest Ecology and Management* 53: 99–105.
- Moos C, Bebi P, Graf F, Mattli J, Rickli C, Schwarz M (2016) How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surf. Process. Landforms* 41, 951–960.
- Ng CWW, Liu HW, Feng S (2015) Analytical solutions for calculating pore-water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. *Can. Geotech. J.* 52: 1981–1992.
- Park H (2000) Physical characteristics of heat and water exchange processes between vegetation and the atmosphere in a deciduous broad-leaved forest. Nagoya University.
- Price AG, Carlyle-Moses DE (2003) Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 69–85.
- Querejeta JI, Egerton-Warburton LM, Allen MF (2008) Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna. *Soil Biol. Biochem.* 39: 409–417.
- Qin CZ, Zhu AX, Pei T, Li BL, Scholten T, Behrens T, Zhou CH (2011) An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agric* 12: 32-43. DOI 10.1007/s11119-009-9152-y
- Retchless D, Mobley W, Davlasheridze M, Atoba K, Ross AD, Highfield W (2021) Mapping cross-scale economic impacts of storm surge events: considerations for design and user testing. *Journal of Maps*, 17(1), 123–135.
- Roth R, Sack C, Baldrice-Franklin G, Chen Y, Donohue R, Houtman L, Prestby T, Tolochko R, Underwood N (2021). Introducing Web Mapping: A Workbook for Interactive Cartography and Visualization on the Open Web. Abstracts of the ICA. 3. 1-2. 10.5194/ica-abs-3-254-2021.
- Rickli C, Red. (2001) Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmensdorf, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 97 S.
- Rickli C, Bebi P, Graf F, Moos C (2019) Shallow landslides: retrospective analysis of the protective effect of forest and conclusions for prediction. *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 175-185.
- Rickli C, Raetzo H, McArdell B, Presler J (2008) Hanginstabilitäten. In: Bezzola, G.R.; Hegg, C. (Ed.) Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 - Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 97-116.
- Schütz JP (2003) Waldbau I: Die Prinzipien der Waldnutzung und der Waldbehandlung. Skript zur Vorlesung Waldbau I. ETH Zürich, 218 S.
- Schwarz M, Cohen D, Or D (2012) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. *Geomorphology* 171/172, 190–200.
- Simmler K (2020) Possibilities of differentiating between forest community types with topographic variables in the canton of Appenzell Auser rhoden. Master's Thesis, Environmental Sciences, ETH Zürich, 120 pp. https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Projekte/slimforest_1842/MSc_Simmler_Kevin.pdf
- SN670010b (2011) Geotechnische Erkundung und Untersuchung / Geotechnische Kenngrössen. Schweizer Norm (SN), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) Zürich, pp. 19.
- Spies TA, Stine PA, Gravenmier R, Long JW, Reilly MJ, tech. coords. (2018) Volume 2—Synthesis of science to inform land management within the Northwest Forest Plan area. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-966. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 371-624. Vol 2.
- Thornton PE, Running SW, White MA (1997) Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology* 190, 214–251, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03128-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03128-9)
- WAG 1991. Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG), vom 4. Oktober 1991, SR 921.0.
- Waser L, Rüetschi M, Rehush N (2021) Künstliche Intelligenz im Wald - der neue «Waldmischungsgrad LFI». *Bündnerwald* 5: 54-57.
- Webpack (2022): Bundle your assets. <https://webpack.js.org/> (aufgerufen am 10.05.2022)
- Yildiz A, Graf F, Rickli C, Springman SM (2018) Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. *Catena*, 166, 98-113.
- Yildiz A, Graf F, Rickli C, Springman SM (2019 a) Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jgeen.18.00209>
- Yildiz A, Graf F, Springman SM (2019 b) An investigation of plant-induced suction and its implications for slope stability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 172, 520-529.
- Yildiz A, Graf F, Springman SM (2020) On the dilatancy of root-permeated soils under partially saturated conditions. *Géotechnique Letters*, 10: 227-230. <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00048>

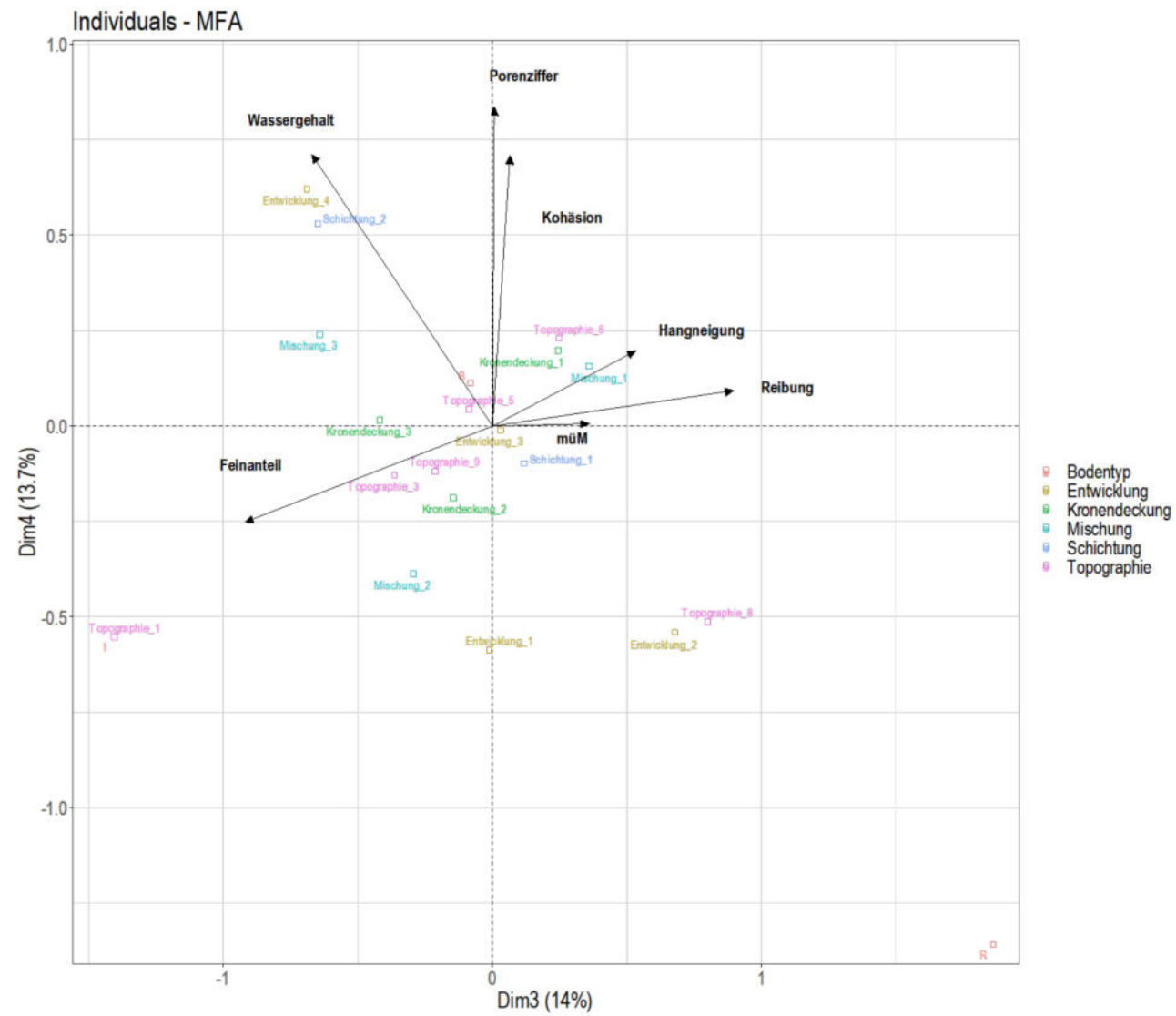
Anhang

Anhang 1: Dokumentierte Rutschungen des 2002-er Ereignisses in Appenzell

Auszug aus der [Hangmuren Datenbank](#) der WSL. Grau markierte Rutschungen sind in Anhang B weiter dokumentiert.

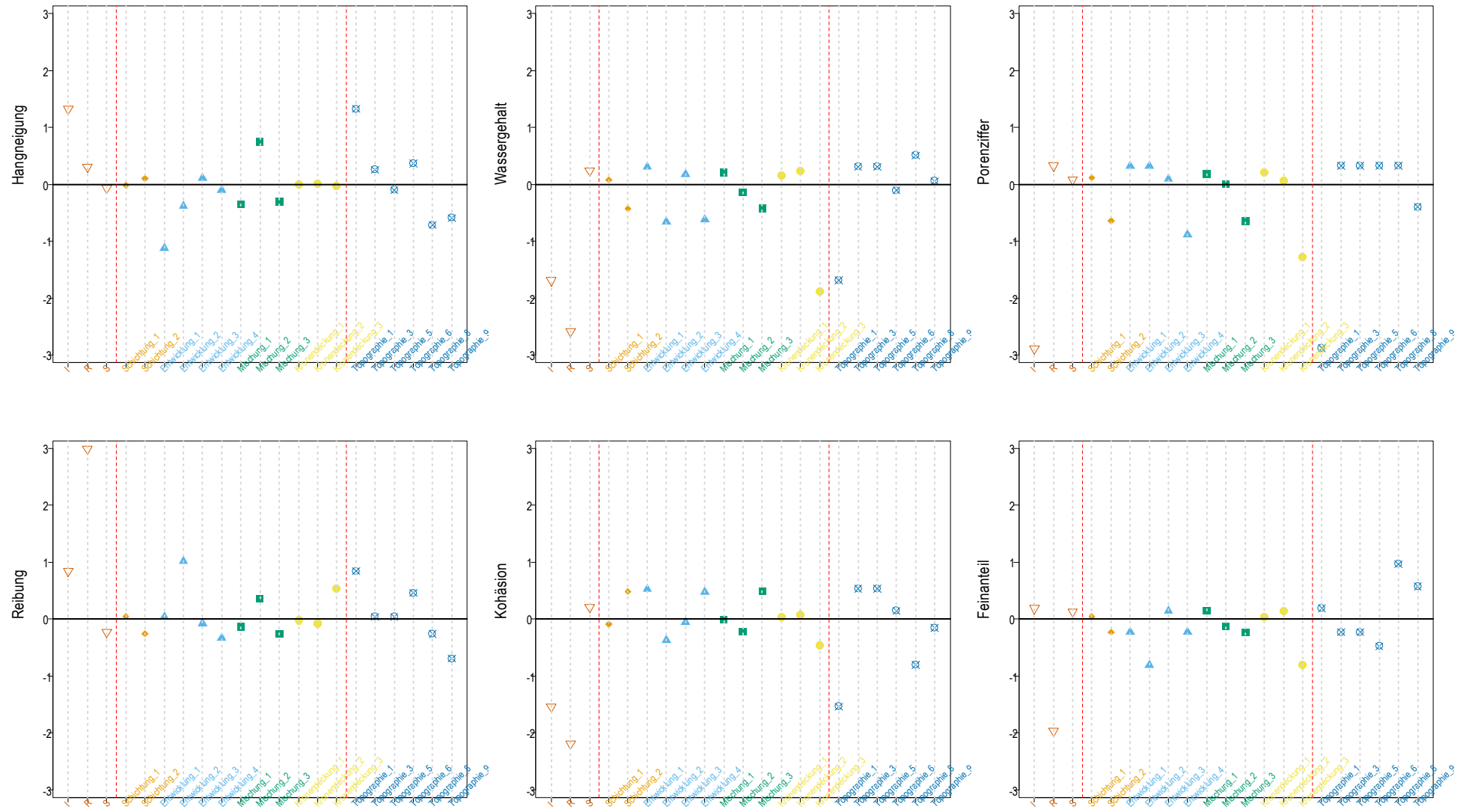
nr	Gemeinde	m.ü.M	USCS	Länge [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Anriss-tiefe [m]	Anrissflä- che [m²]	Volumen [m³]	Φ' [°]	α [°]	Schichtung neu (orig.)	Entwicklung neu (orig.)	Mischung neu (orig.)	Deckung neu (orig.)	Topo-gra- phie
224	Trogen	890	SM	13.5	9.5	1.6	0.7	80	80	33.6	30	1	3(5)	2	1	8
227	Trogen	795	SM	19.0	11.5	0.5	0.7	120	48	33.6	38	1	2	3	2	6
228	Trogen	800	SM	15.0	9.5	0.5	0.8	105	41	33.6	41	1	3(5)	2	2	6
251	Rehetobel	840	SM	24.5	26.0	1.2	≈ 0	500	220	33.6	35	1	3(4)	1	1	5
255	Rehetobel	800	SM	40.0	15.5	1.2	0.7	425	210	33.6	35	1	3(5)	1	1	9
259	Rehetobel	820	SM	17.0	10.0	1.0	0.6	120	70	33.6	31	1	2	3	2(3)	3
262	Trogen	780	SM	29.0	14.0	0.8	0.7	250	125	33.6	30	1	1	3	3(5)	9
266	Rehetobel	920	SW	21.5	9.0	0.7	0.5	160	80	38.0	32	1	2	1	1	6
267	Wald	900	SM	24.5	17.0	1.0	1.0	300	150	33.6	35	1	3(4)	1	2	6
271	Wald	840	SM	13.5	10.0	0.6	0.3	96	40	33.6	35	1	3(5)	1	2	3
272	Wald	800	SM	11.5	16.0	1.6	1.1	120	120	33.6	32	1	3(5)	1	2(3)	9
273	Trogen	780	CL-ML	19.5	8.5	0.7	0.5	105	41	32.7	34	1	3(5)	2	2(3)	8
274	Trogen	780	CL	71.0	24.0	1.1	0.7	1200	720	30.7	30	1	3(5)	1	1	9
275	Trogen	800	SM	12.0	13.5	1.2	1.0	100	50	33.6	32	1	3(4)	2	1	3
277	Wald	870	SM	25.0	27.0	1.2	1.1	500	300	33.6	31	1	3(4)	1	1	6
281	Rehetobel	820	SC	14.5	10.5	1.1	0.7	80	40	34.8	42	1	3(4)	2	2	1
282	Rehetobel	840	SM	21.0	13.5	1.0	0.7	216	125	33.6	34	1	3	1	2	6
285	Rehetobel	720	SM	20.0	10.0	0.7	0.1	120	45	33.6	38	1	3(5)	1	2	9
286	Rehetobel	830	CL	16.0	14.0	0.9	0.3	144	60	30.7	26	1	3(5)	1	2	9
288	Wald	970	SM	10.0	10.0	1.0	1.2	72	45	33.6	35	1	3(4)	1	2	6
289	Wald	1040	SM	14.0	17.0	1.1	1.5	180	146	33.6	34	1	3(4)	1	1	6
291	Wald	880	CL	14.0	12.0	0.8	0.7	132	60	30.7	30	1	3(5)	1	1	9
292	Wald	900	SM	8.5	10.0	1.1	1.0	64	40	33.6	38	1	3(5)	1	1	6
294	Wald	880	SM	15.0	12.5	1.2	1.5	132	66	33.6	43	1	3(4)	2	2	6
295	Wald	860	SM	11.0	13.5	0.9	0.6	100	50	33.6	44	1	3(5)	2	1	6
296	Wald	860	SM	10.0	6.5	1.3	0.8	45	32	33.6	49	1	3(4)	2	1	3
297	Wald	870	SW	28.5	24.0	1.6	1.5	390	425	38.0	42	1	3(4)	2	3(5)	6
250	Rehetobel	860	SM	24.0	25.0	0.5	1.7	360	150	33.6	40	2	3(5)	1	1	6
276	Wald	850	SM	30.0	15.0	0.7	0.7	390	200	33.6	35	2(3)	4(6)	2	2(3)	6
279	Rehetobel	820	SM	20.0	10.5	1.1	0.5	160	80	33.6	34	2(3)	4(6)	1	2(3)	9
283	Rehetobel	870	GC	18.0	8.5	0.9	0.3	112	48	31.4	34	2(3)	4(6)	3	3(5)	9
287	Rehetobel	845	SM	8.5	9.5	0.8	0.7	72	43	33.6	37	2(3)	4(6)	3	1	9

Anhang 2: Multi Faktor Analyse (MFA) für die Dimensionen 3 und 4.

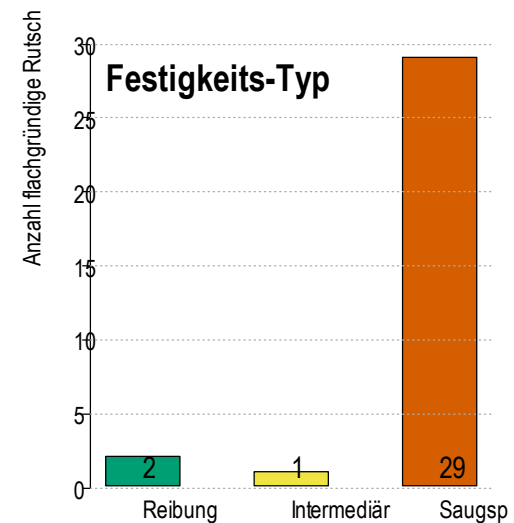
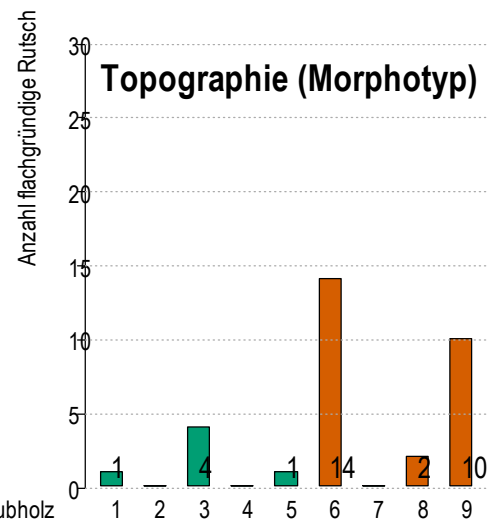
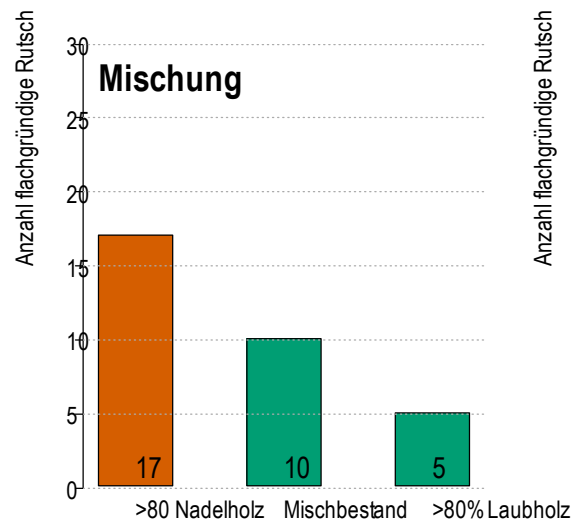
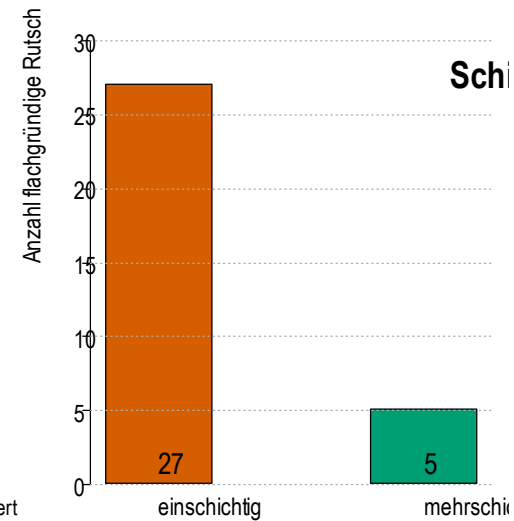
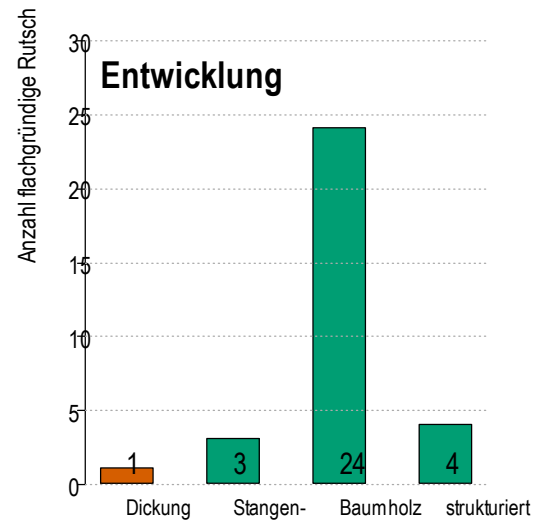
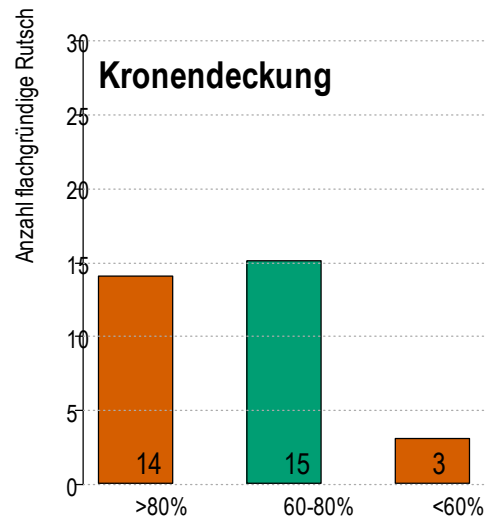


Anhang 3: Beziehung quantitativer und qualitativer Eigenschaften flachgründiger Rutschungen

...



Anhang 4: Waldstruktur (**schlecht**- und **gut**-strukturiert), Topographie und Bodenfestigkeit



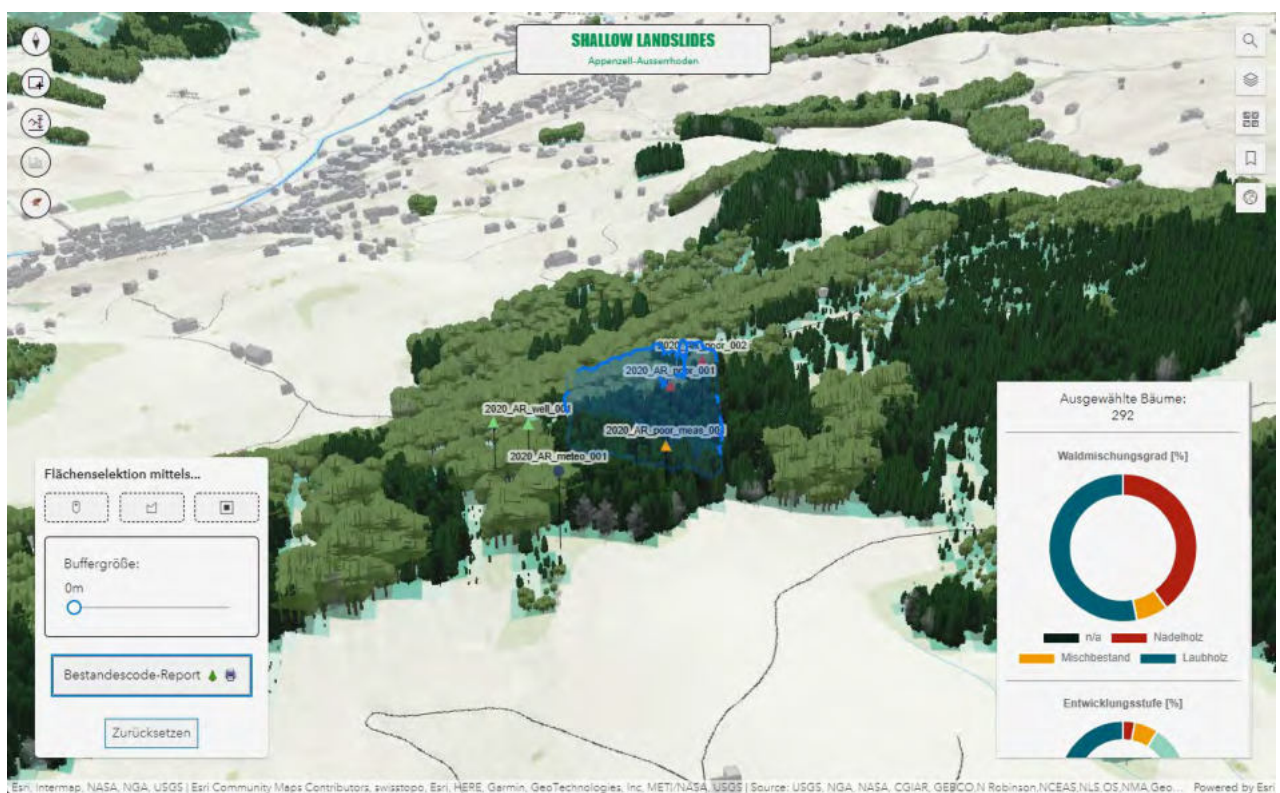
Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?

Interaktive Karten zur Wirkung gegen flachgründiger Rutschungen

WHFF-Projekt 2017.19

ANHANG B

- Anleitung für die Web-Applikation «SHALLOW LANDSLIDES»
- Bestandescode-Reports der Rutschungen 274, 276, 281, 297



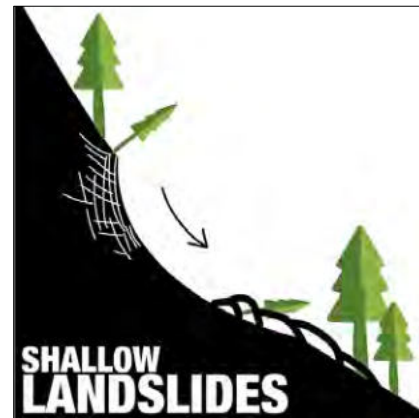
SHALLOW LANDSLIDES

Web-Applikation | *maps.wsl.ch*

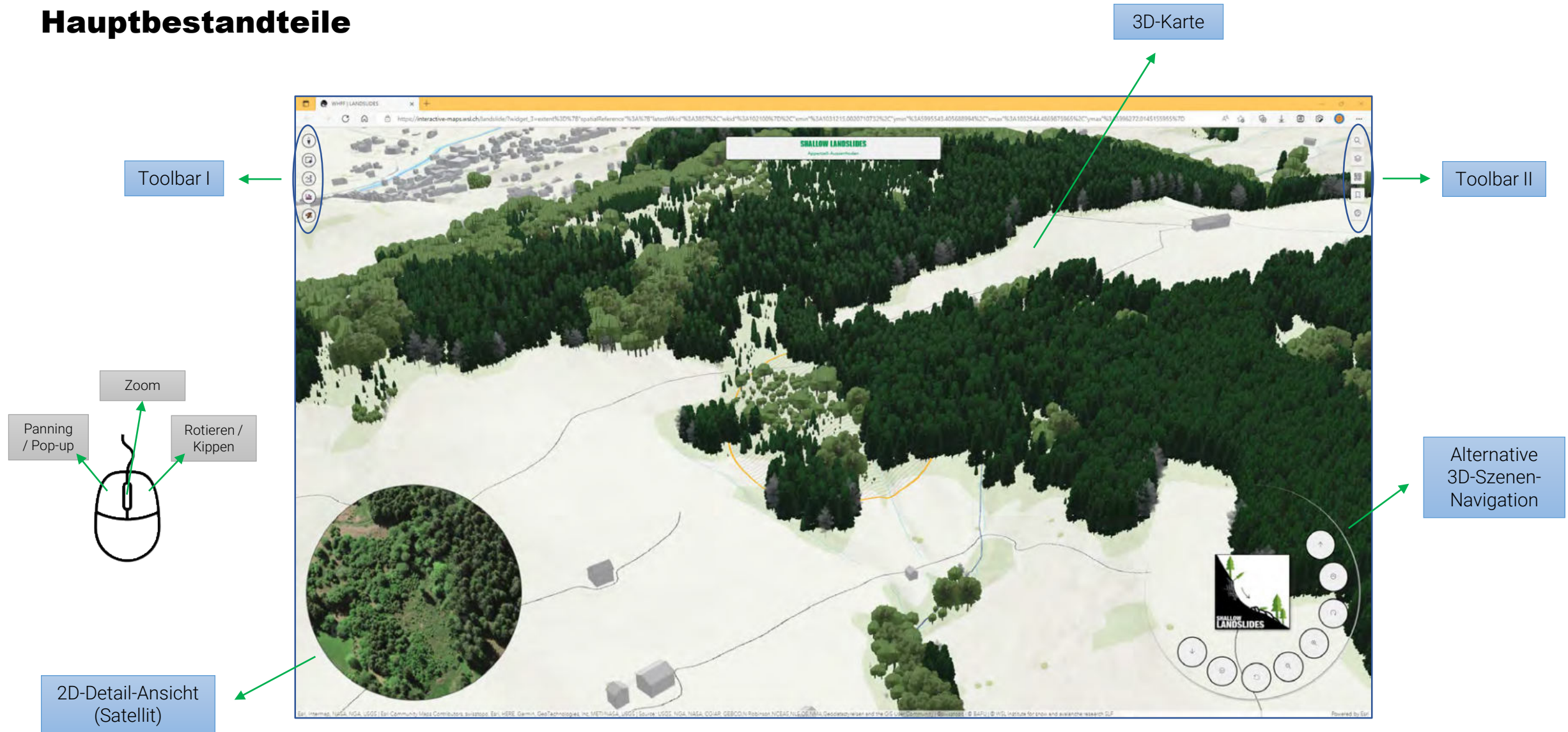
01.06.2022

© WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF

(Powered by ESRI, Chart.js, webpack)

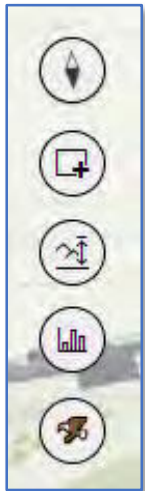


Hauptbestandteile



Die Web-Applikation besteht aus einer 3D-Karte mit visualisierten Einzelbäumen sowie topographischen Objekten (z.B. Häuser, Strassen). Im Zentrum befindet sich ein orange-farbener Kreis, der die Ausdehnung der dynamischen 2D-Detail-Karte unten links andeutet. Bedient werden kann die Karten-App mit der Maus oder über die alternative 3D-Szenen-Navigation unten rechts.

Toolbars I & II



Kompass	Richtet die Web-Karte nach Norden aus.
Screenshot	Startet den Screenshot-Workflow, um einen bestimmten Ausschnitt der Karte als Bild zu speichern und herunterzuladen.
Höhen-Profil	Öffnet das Höhen-Profil Widget, mit dem verschiedene Statistiken über das Terrain (z.B. Hangneigung) generiert werden können.
Bestandescode-Analyse	Widget zur Bestandescode-Analyse.
Nadir-Ansicht	Kippt die Web-Karte aus der momentanen Position in eine Nadir-Ansicht.



Suchen	Mit diesem Tool kann eine Adresse oder ein Ort gefunden werden.
Layerliste & Legende	Die Layerliste bietet einen Überblick der in der Karte vorhandenen Layer (Geoinformationen) und die Möglichkeit für den Anwender einzelne Layer sichtbar zu machen bzw. auszublenden. Die Legende zeigt eine farbliche, symbolische Erklärung des Karteninhalts.
Grundkarten	Dieses Widget beinhaltet eine Auswahl von Grundkarten zwischen denen der Anwender wechseln kann.
Lesezeichen	... sind im Voraus definierte spezielle Kartenansichten.
Standortbeschreibung	Dieses Widget gibt eine kurze textuelle Beschreibung des Standortes aus.

||-> Die farblich hervorgehobenen Tools werden im Folgenden genauer beschrieben und erklärt.

Widget: Höhen-Profil

Kurzbeschreibung

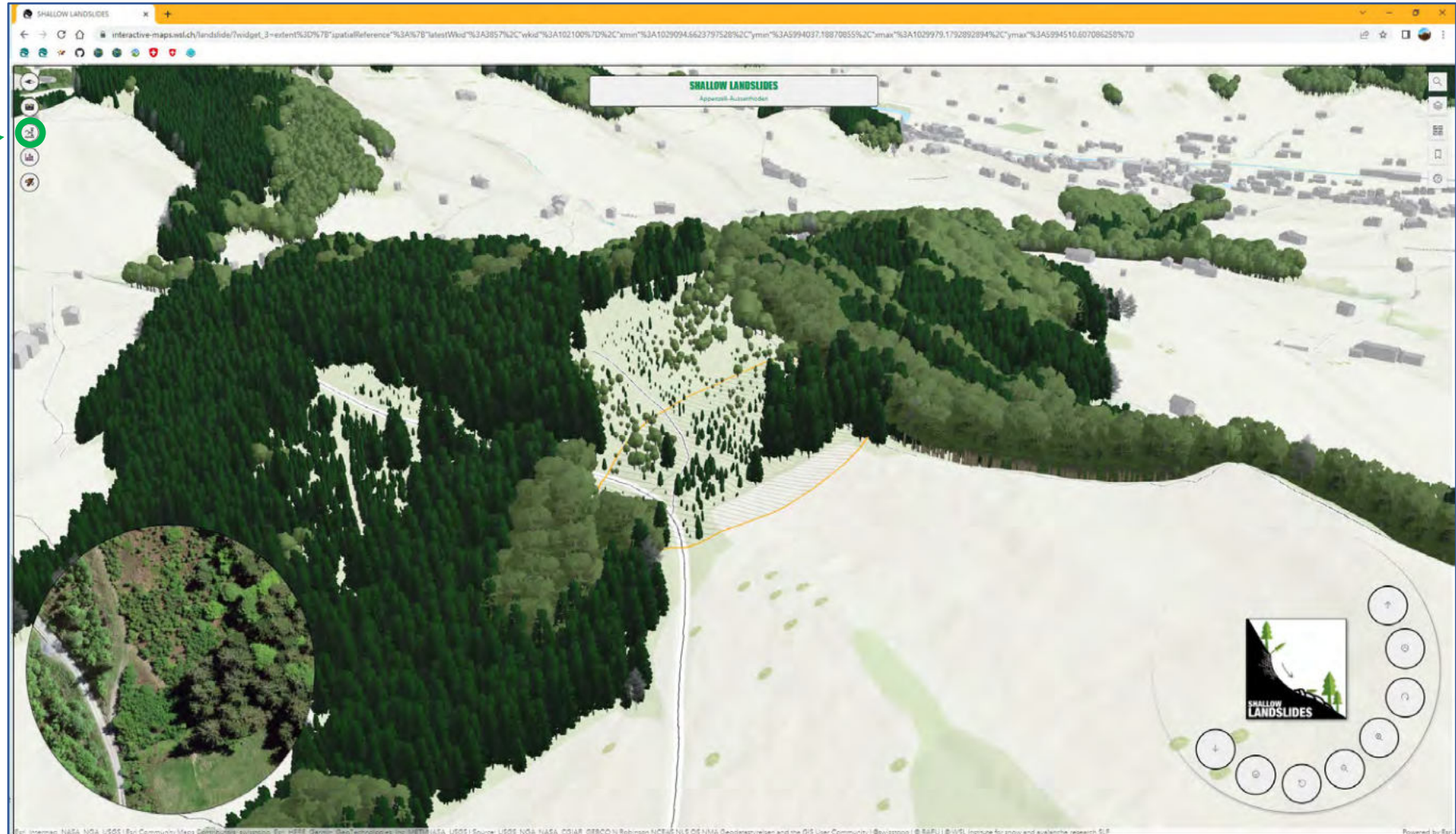
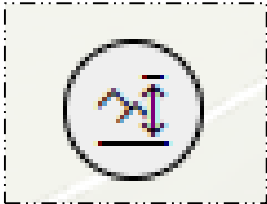
Ein Höhen-Profil erfordert vom Benutzer das Zeichnen einer Profillinie (dunkelblau) in der Web-Karte. Der Startpunkt (und evtl. zusätzliche) werden mit einem Mausklick gesetzt. Mit einem Doppelklick schließt man das Profil ab und die entsprechenden Parameter werden generiert. Um das Tool zurückzusetzen, kann entweder ein neues Profil gezeichnet werden oder auf den Mülleimer oben rechts geklickt werden.



Widget: Höhen-Profil

[1] Tool aktivieren

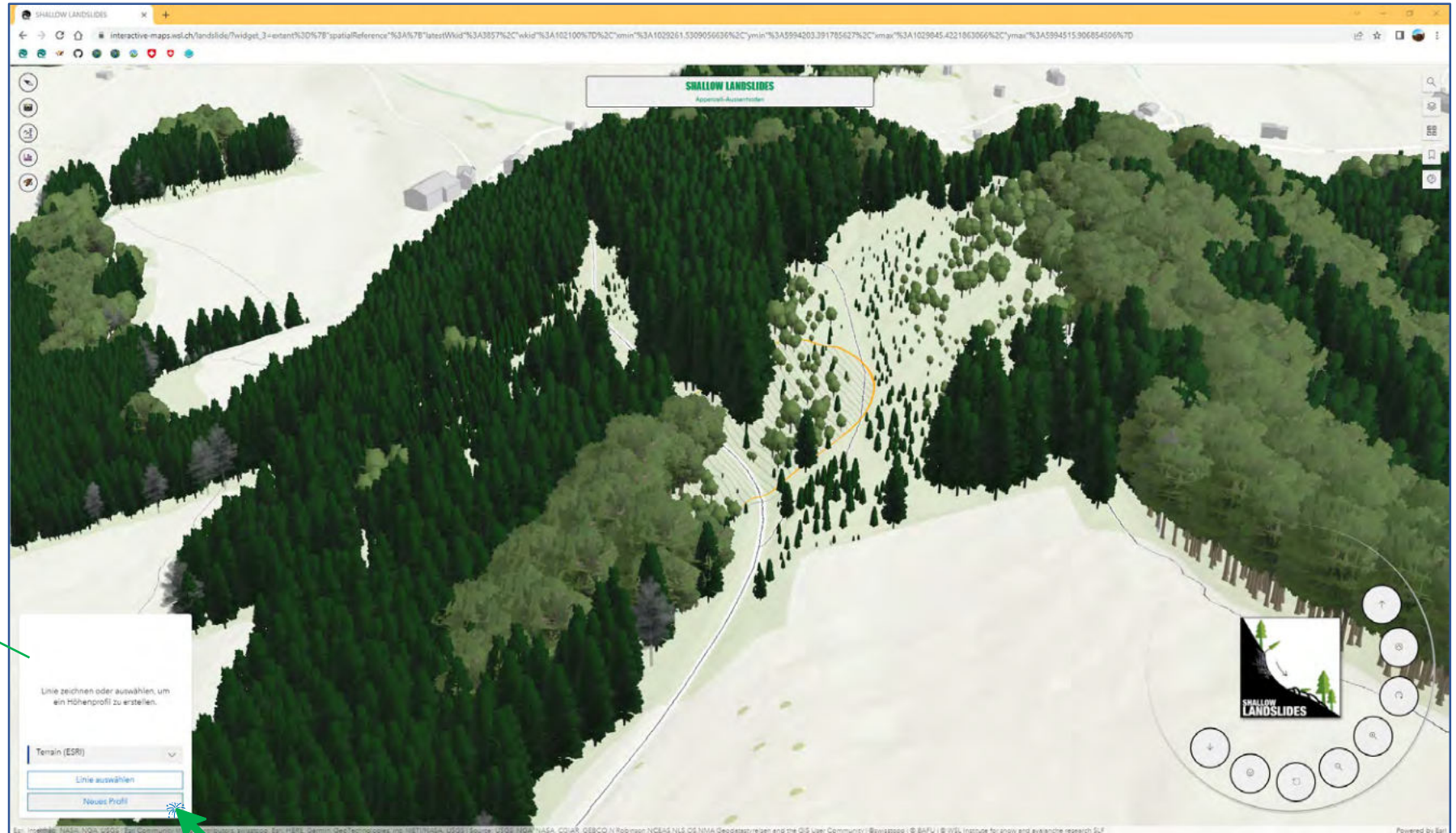
Das Höhen-Profil-Tool
öffnet sich links unten
durch einen Mausklick auf
den entsprechenden
Button (nächste Folie).



Widget: Höhen-Profil

[2] Vorbereitung des Tools

Anstelle der 2D-Satellitenansicht erscheint das Höhen-Profil mit zwei Auswahlmöglichkeiten: «Linie auswählen» und «Neues Profil». Im Normalfall selektiert man (wie in diesem Beispiel) «Neues Profil» um in den Sketch-Modus zu gelangen. Die Variante «Linie auswählen» ermöglicht das Selektieren eines bereits in der Karte vorhandenen Linienobjektes.

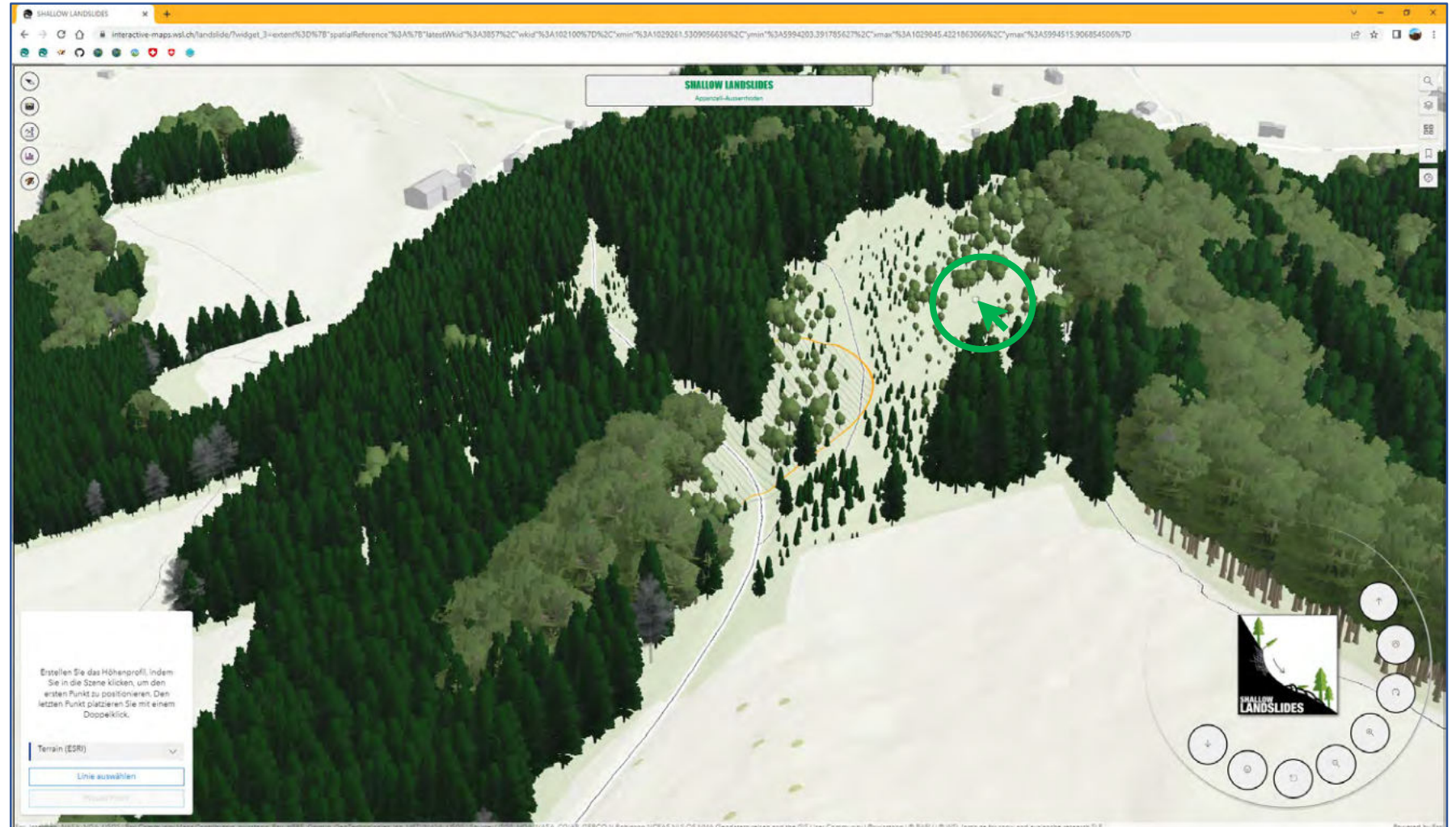


Widget: Höhen-Profil

[3.1] Zeichnen der Profillinie

Am Mauszeiger hängt nun eine kleine, graue Kugel, die beim Bewegen über das 3D-Terrain läuft. Sie deutet an, dass der Benutzer sich jetzt im Sketch-Modus befindet. Ein Klick in das Gelände startet das Höhen-Profil (nächste Folie).

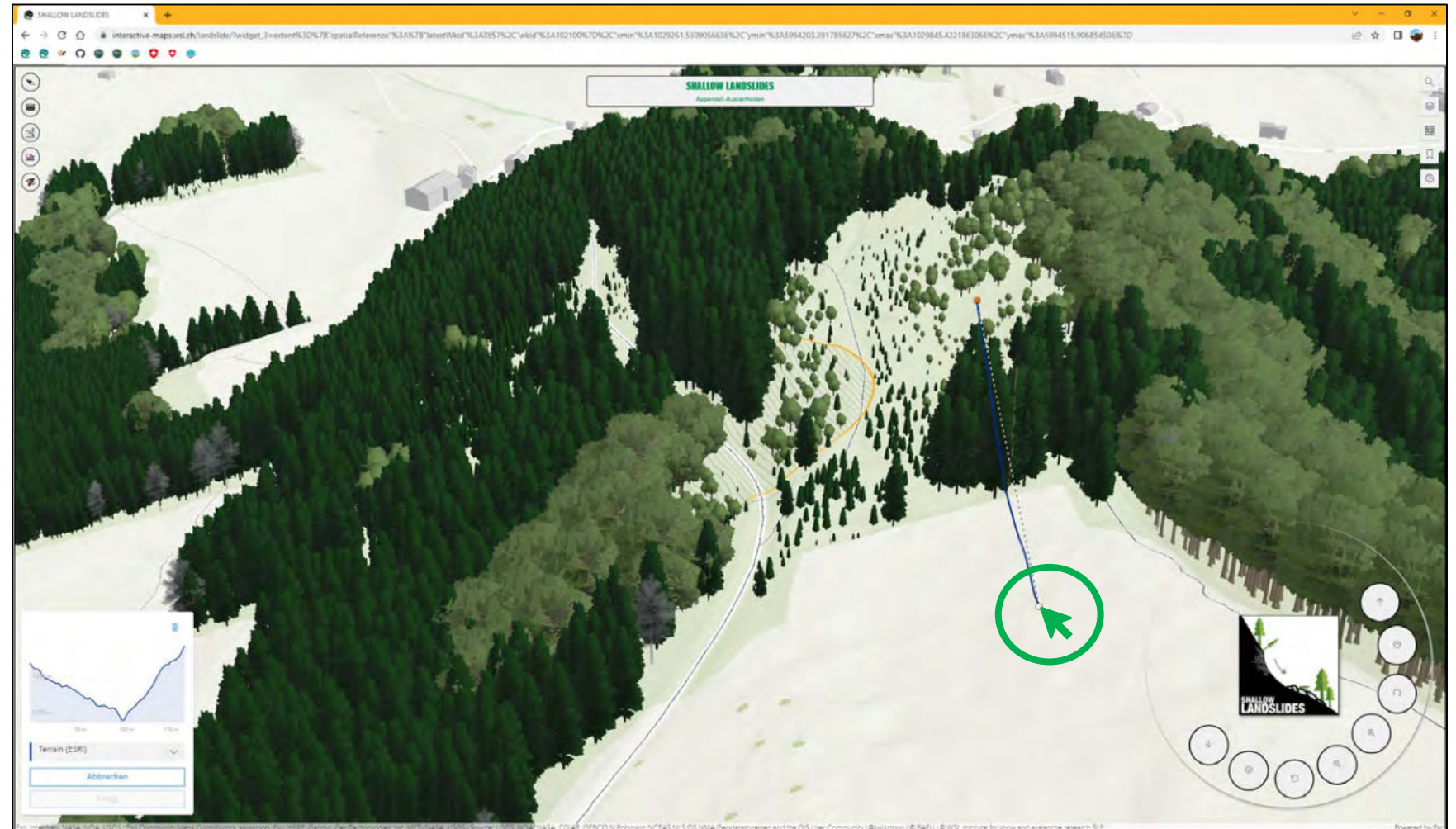
HINWEIS: Grüner Kreis in Web-Applikation nicht vorhanden und Maus stark vergrößert dargestellt



Widget: Höhen-Profil

[3.2] Zeichnen der Profillinie

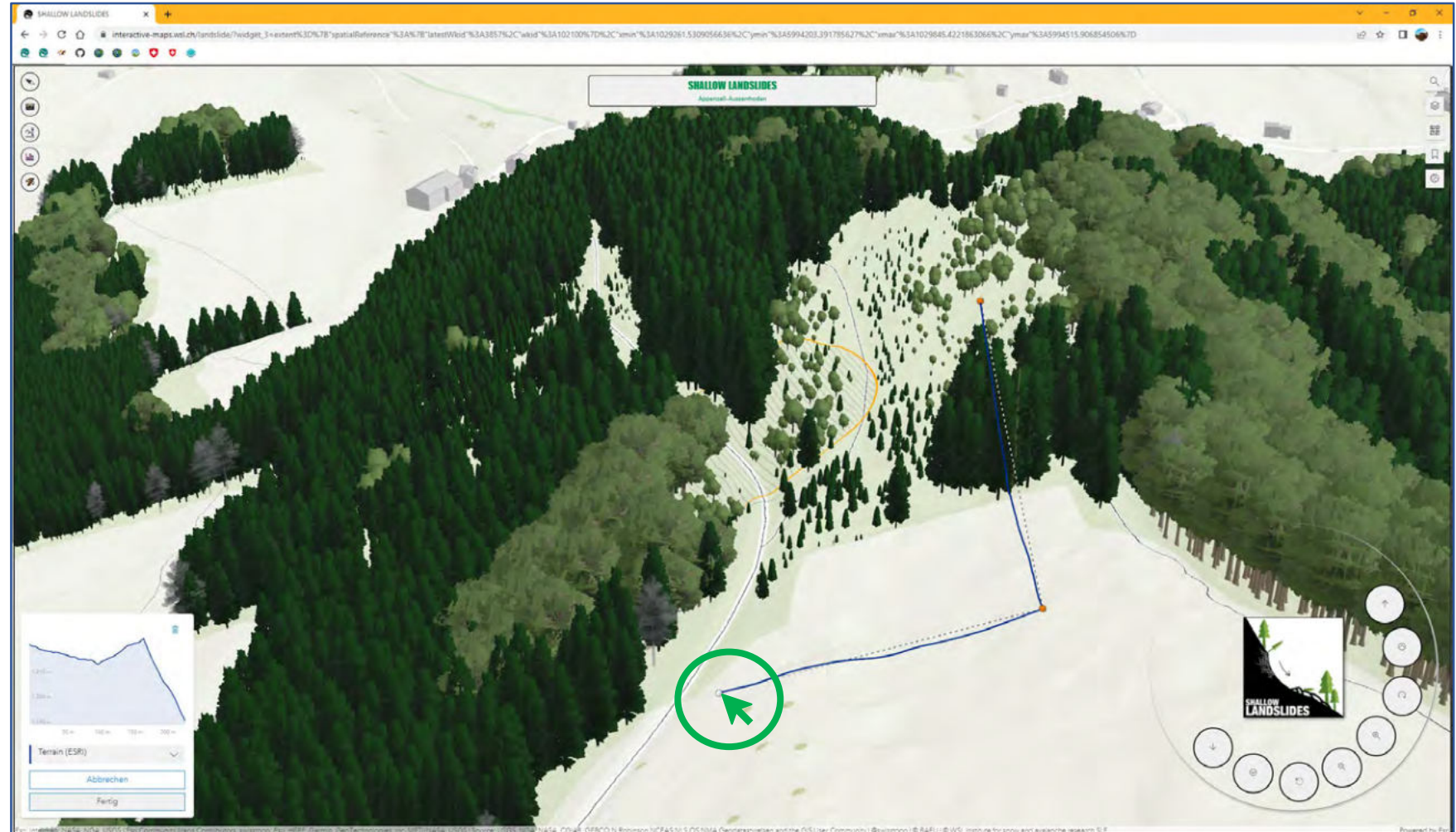
Sobald ein Punkt gesetzt ist und eine Linie aufgezo-gen wird, erscheint im Höhen-Profil-Fenster bereits ein sich stetig verändernder Graph (s. links unten). Durch weitere Klicks in das Gelände können beliebig viele Stützpunkte gesetzt werden.



Widget: Höhen-Profil

[3.3] Zeichnen der Profillinie

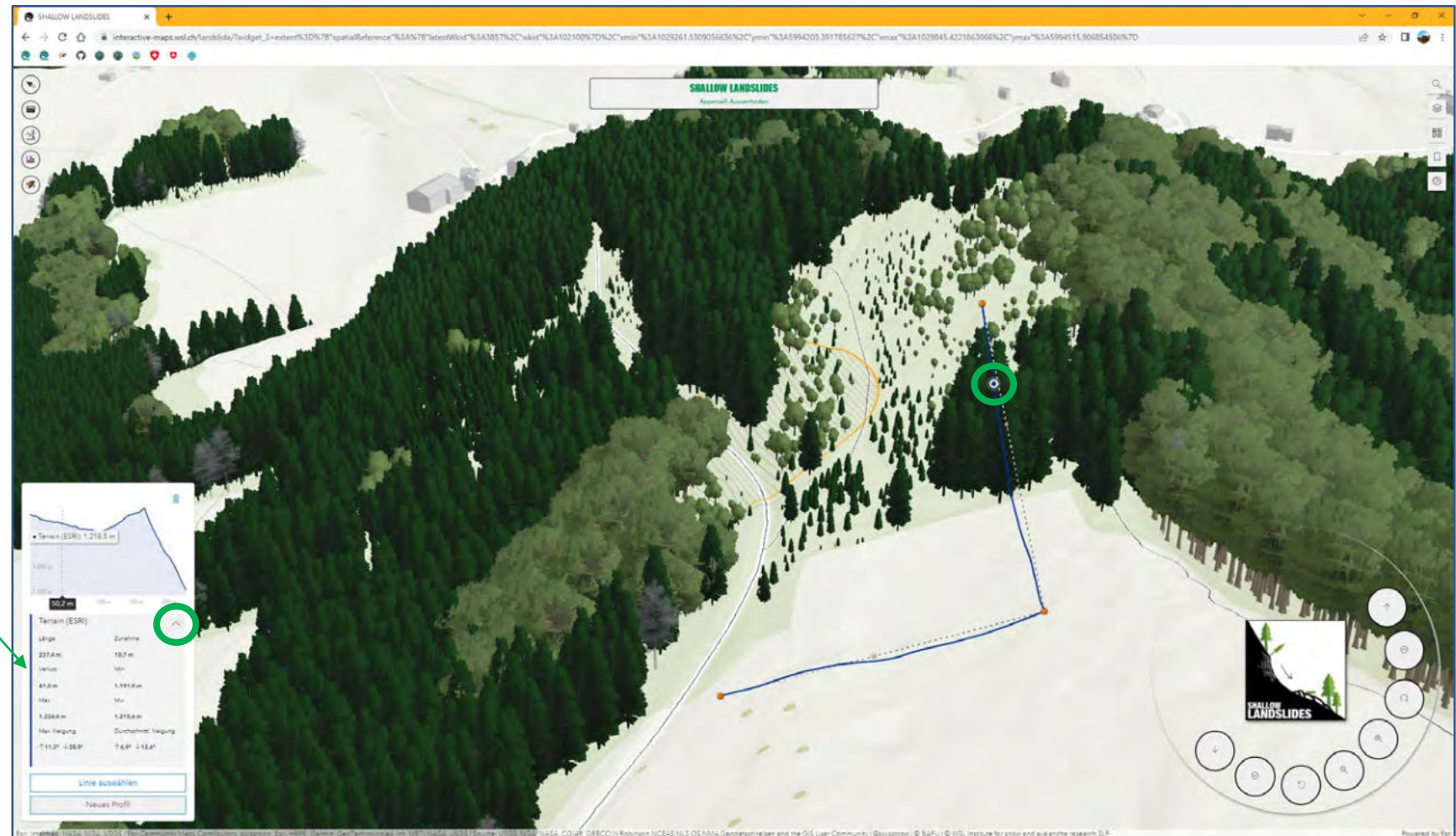
Zum Abschluss der Höhen-Profillinie wird ein Doppel-Klick gesetzt.



Widget: Höhen-Profil

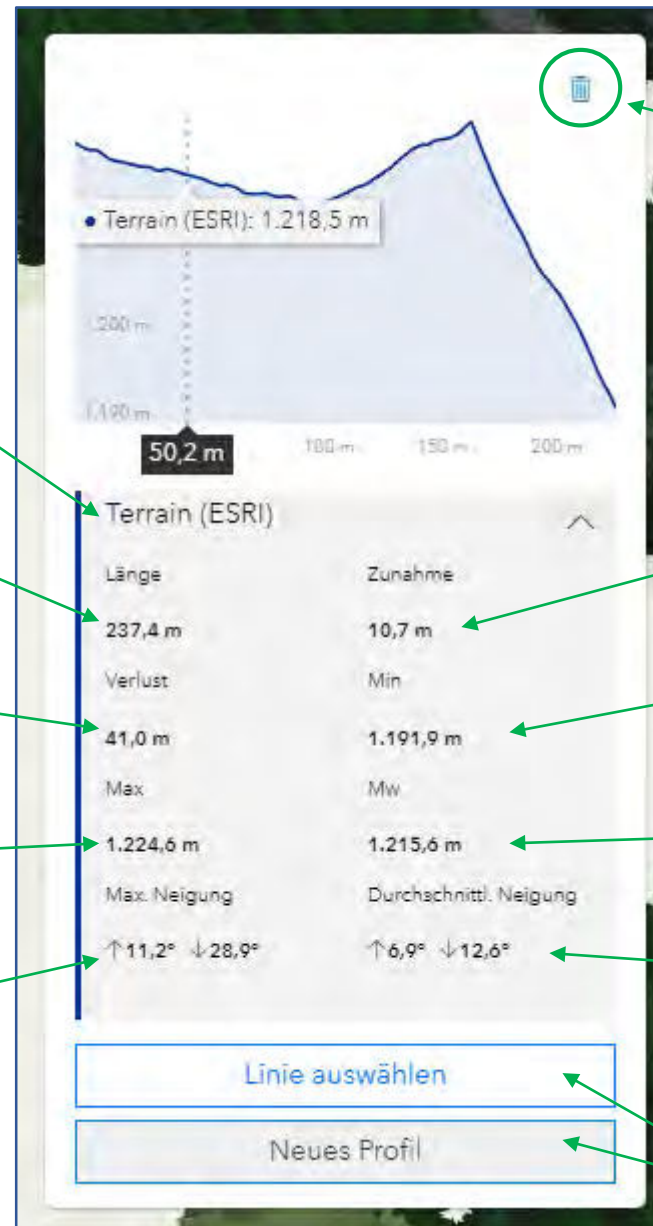
[4.1] Geländestatistiken

Die Statistiken über das Terrain klappen nach einem Klick auf den markierten Button oben heraus und sind auf der nächsten Folie näher beschrieben. Beim Schweben der Maustaste («Hovern») entlang des Graphen wird der korrespondierende Punkt in der Karte angezeigt.



Widget: Höhen-Profil

[4.2] Geländestatistiken



RESET-Button:
Löscht das Höhen-Profil und
die berechneten Statistiken

Verwendetes Höhenmodell: In diesem Fall
das «Global Terrain» von ESRI

Gesamtlänge des Höhenprofils

Kumulierter Höhenverlust
entlang des Profils

Maximalhöhe
entlang des Profils

Maximale Hangneigung in °
(aufwärts / abwärts)

Kumulierte Höhenzunahme
entlang des Profils

Minimalhöhe
entlang des Profils

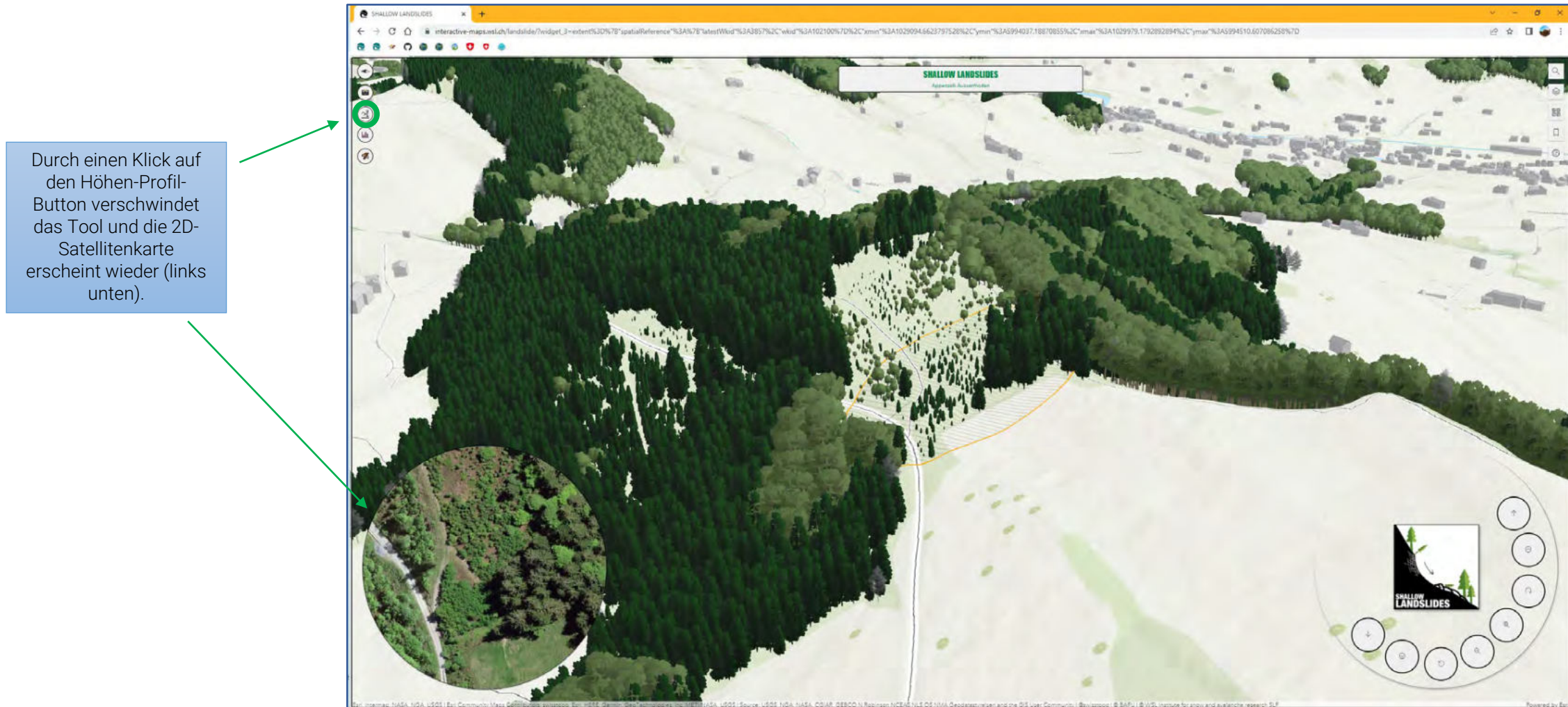
Durschnittl. Höhe
entlang des Profils

Durschnittl. Hangneigung in °
(aufwärts / abwärts)

Ein Klick auf eine der beiden Optionen setzt das
bestehende Höhen-Profil zurück und der Benutzer
kommt wieder in den Sketch-Modus.

Widget: Höhen-Profil

[5] Tool beenden



Widget: Bestandescode-Analyse

Kurzbeschreibung

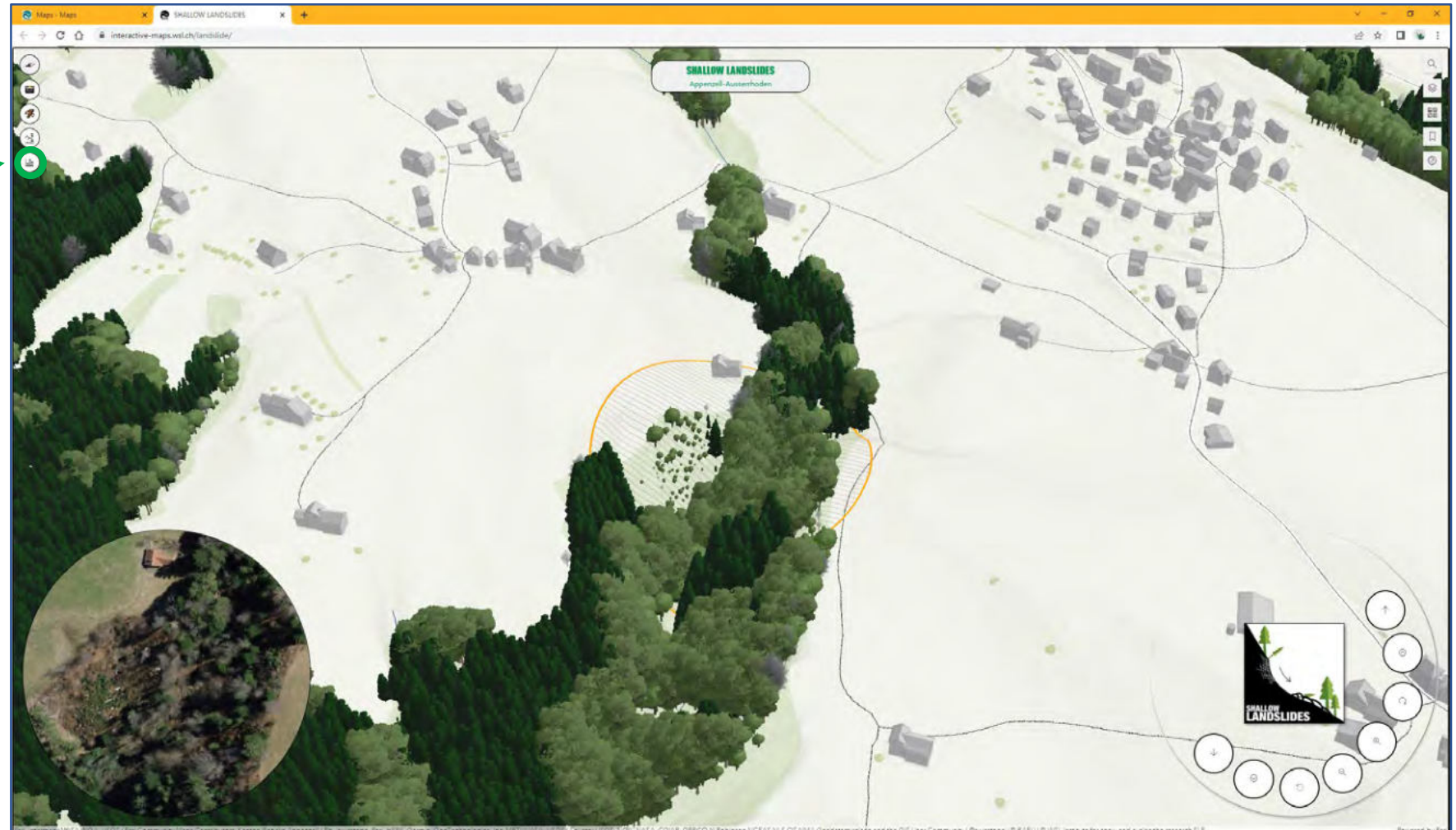
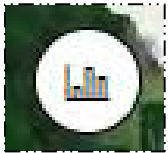


Dieses Widget ermöglicht die Selektion eines Waldstücks durch den Benutzer und berechnet die dazugehörigen Parameter des Bestandescodes in Prozent: Waldmischungsgrad, Entwicklungsstufe, Deckungsgrad, Schichtung

Widget: Bestandescode-Analyse

[1] Tool aktivieren

Das Bestandescode-Analyse-Tool öffnet sich links unten durch einen Mausklick auf den entsprechenden Button (nächste Folie).



Widget: Bestandescode-Analyse

[2] Panel-Erklärung

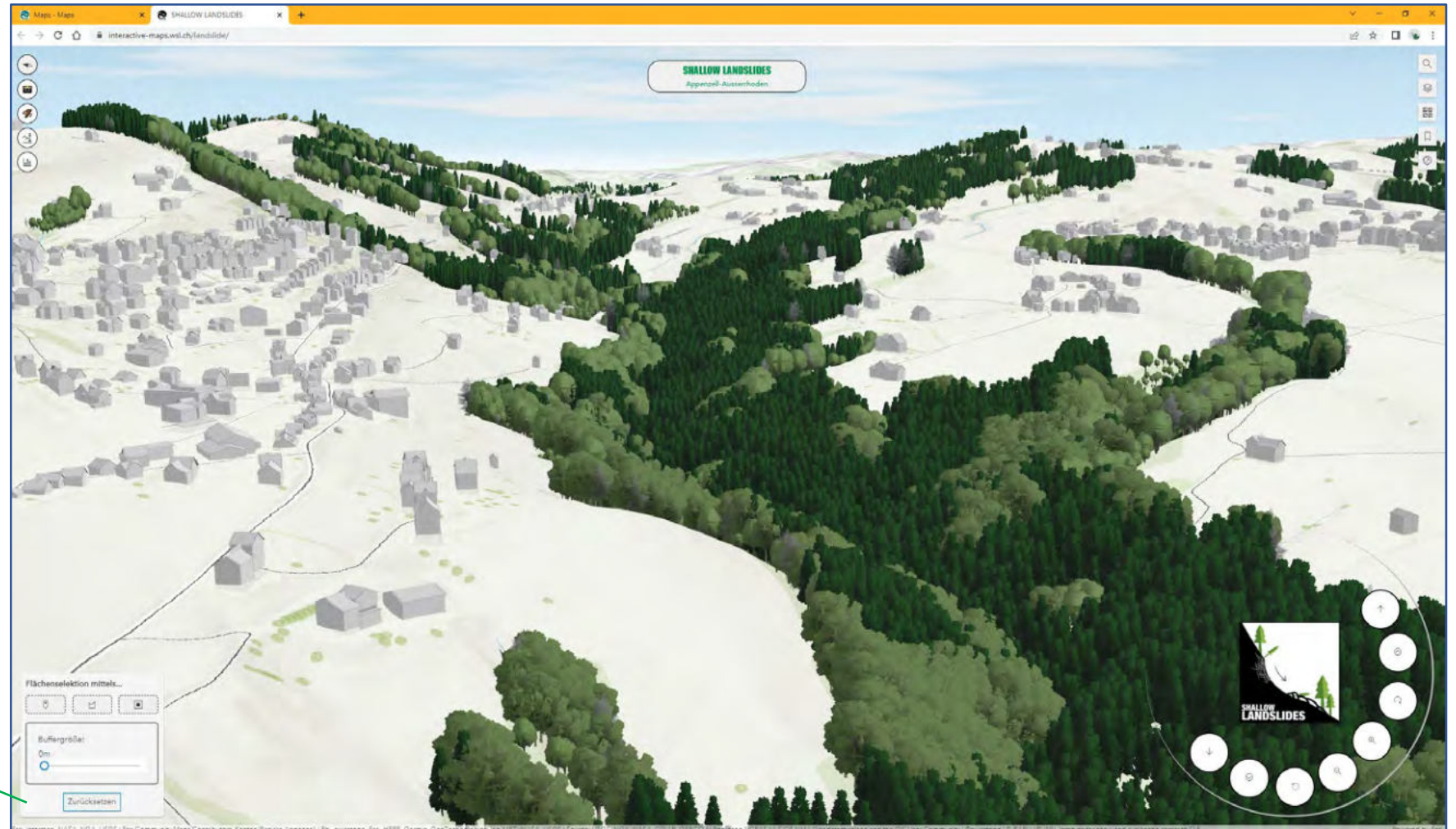
Mittels des Analyse-Panels kann eine gewünschte Fläche innerhalb des Waldes selektiert werden. Diese wird entweder durch einen Kreis mit einem speziellen Radius [1] (Buffergröße), ein freihändiges Polygon [2] oder mit einer vorbestimmten Fläche [3] (50x30m, 100x100m) definiert.

Flächenselektion mittels...

1 2 3

Buffergröße:
0m

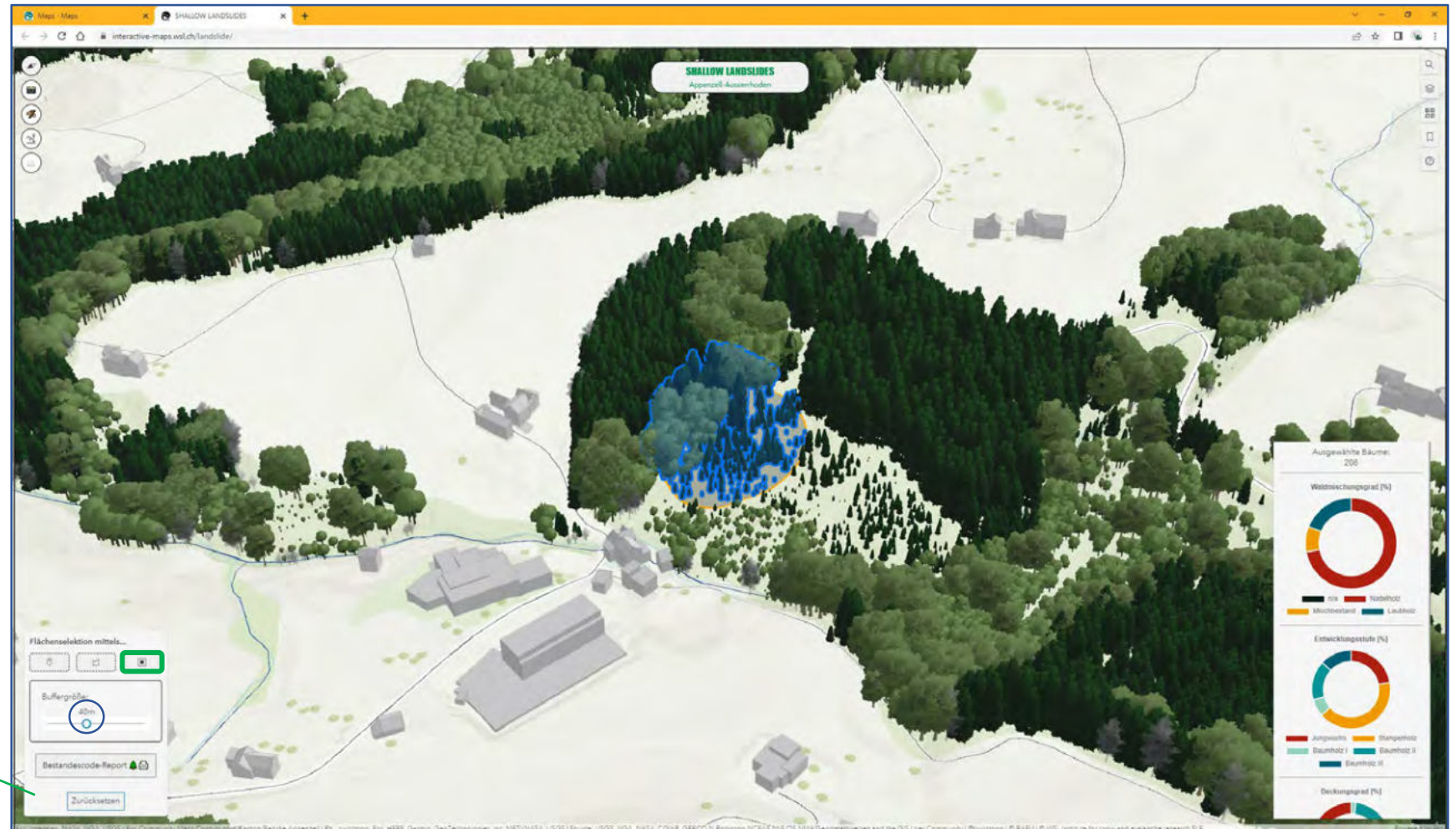
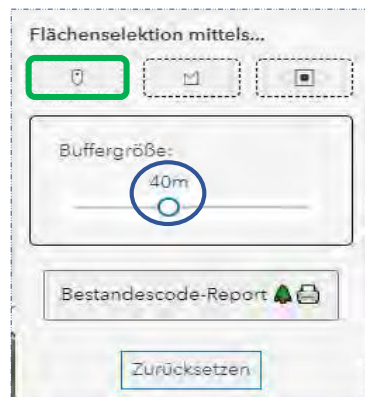
Zurücksetzen



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.1] Selektion mit Kreisbuffer

Bei Selektion einer Fläche mit dem Kreisbuffer muss zuerst ein entsprechender Radius (Buffergröße) mit dem Schieberegler ausgewählt werden. Nach einem Klick auf den entsprechenden Button (grün markiert) kann dann der Mittelpunkt in der Karte platziert werden. Die blau markierten Bäume zeigen die Selektion an. Durch ein Ändern der Buffergröße passt sich die Selektion in der Karte dynamisch an.



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.2] Selektion mit freihändigem Polygon

Bei Selektion einer Fläche mit der Option „freihändiges Polygon“ wird ein Vieleck mit beliebig vielen Stützpunkten gezeichnet. Durch einen Klick auf den markierten Button wird der Sketch-Modus aktiviert. Nachdem alle Stützpunkte gesetzt sind, schließt man die Fläche mit einem Doppelklick ab. Weiterhin erscheint im Menü der Perimeter (Umfang) des Vielecks.

Flächenselektion mittels...

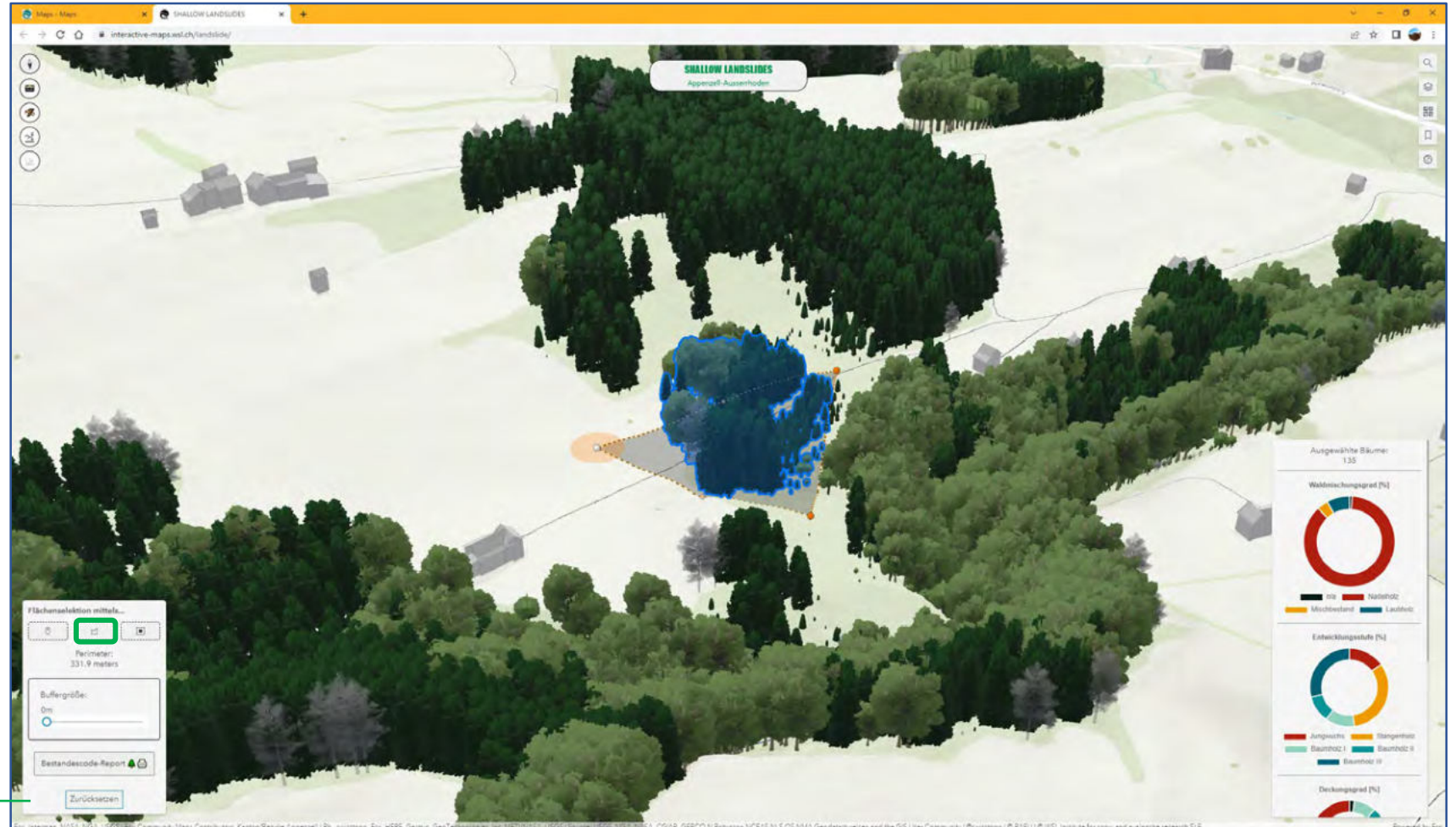
☐ ☒ ☐

Perimeter:
331.9 meters

Buffergröße:
0m

Bestandescode-Report 📄

Zurücksetzen



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.3] Selektion mit wählbaren Flächen

Bei dieser Methode kann zwischen 2 vordefinierten Flächen gewählt werden:

50x30m, 100x100m

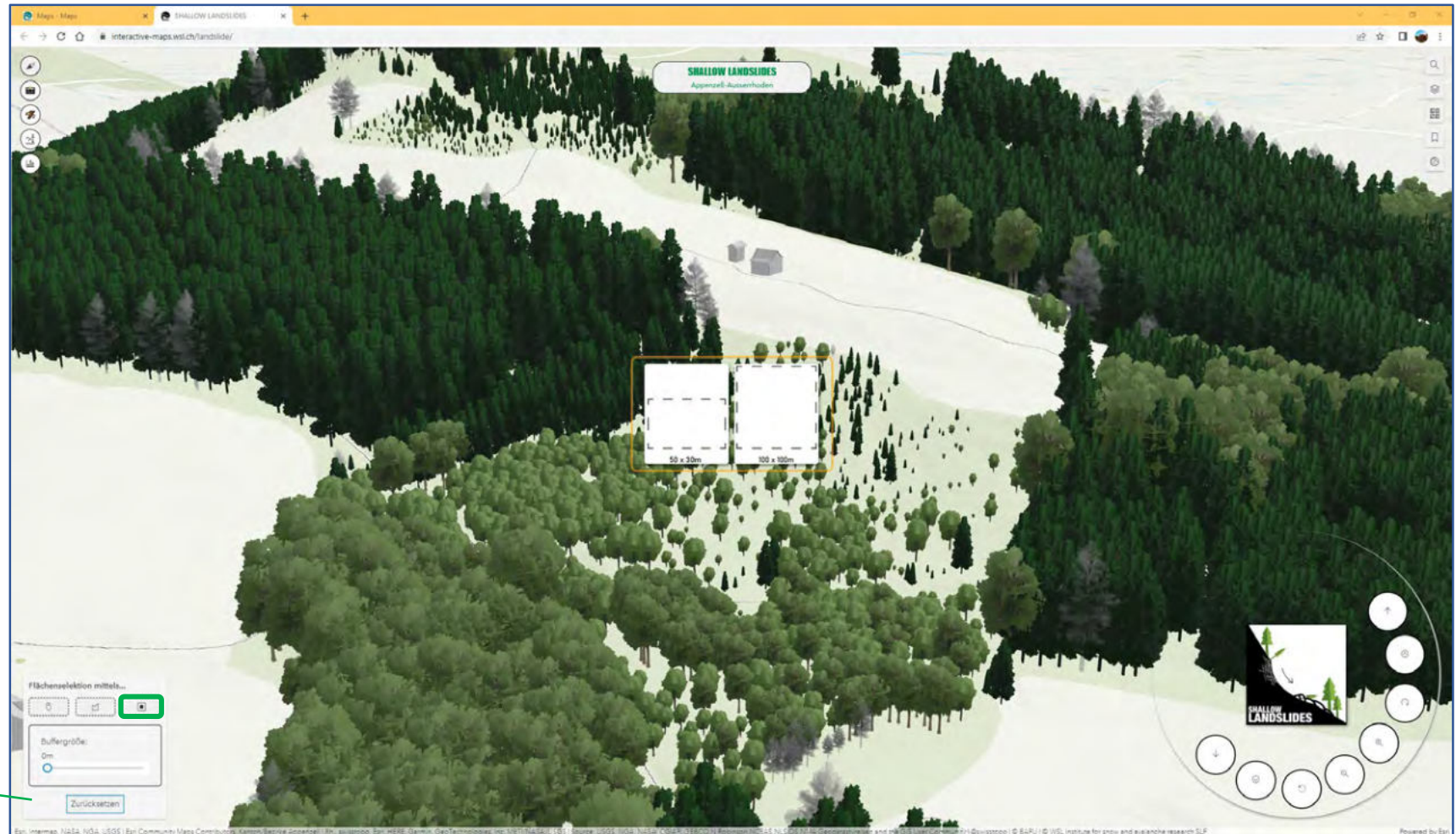
Ein Klick auf die gewünschte Fläche bringt den Benutzer in den Sketch-Modus und die Fläche kann mit einem weiteren Klick in die Karte platziert werden.

Flächenselektion mittels...

☐ ☐ ☒

Buffergröße:
0m

Zurücksetzen



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.3.1] Selektion mit wählbaren Flächen, 50x30m

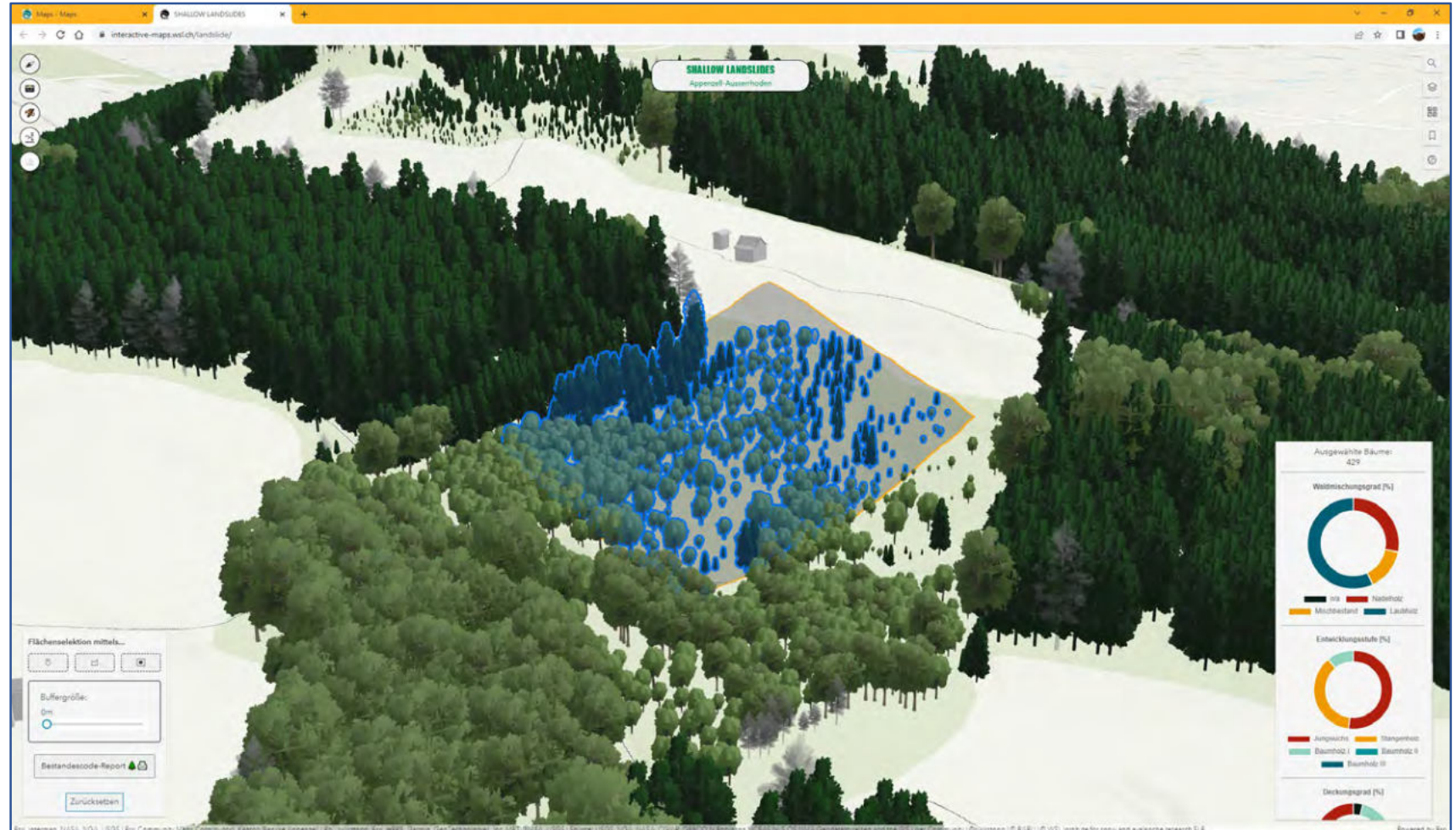
Hier in der Karte sichtbar ist
das eben gesetzte 50x30m
Rechteck.



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.3.2] Selektion mit wählbaren Flächen, 100x100m

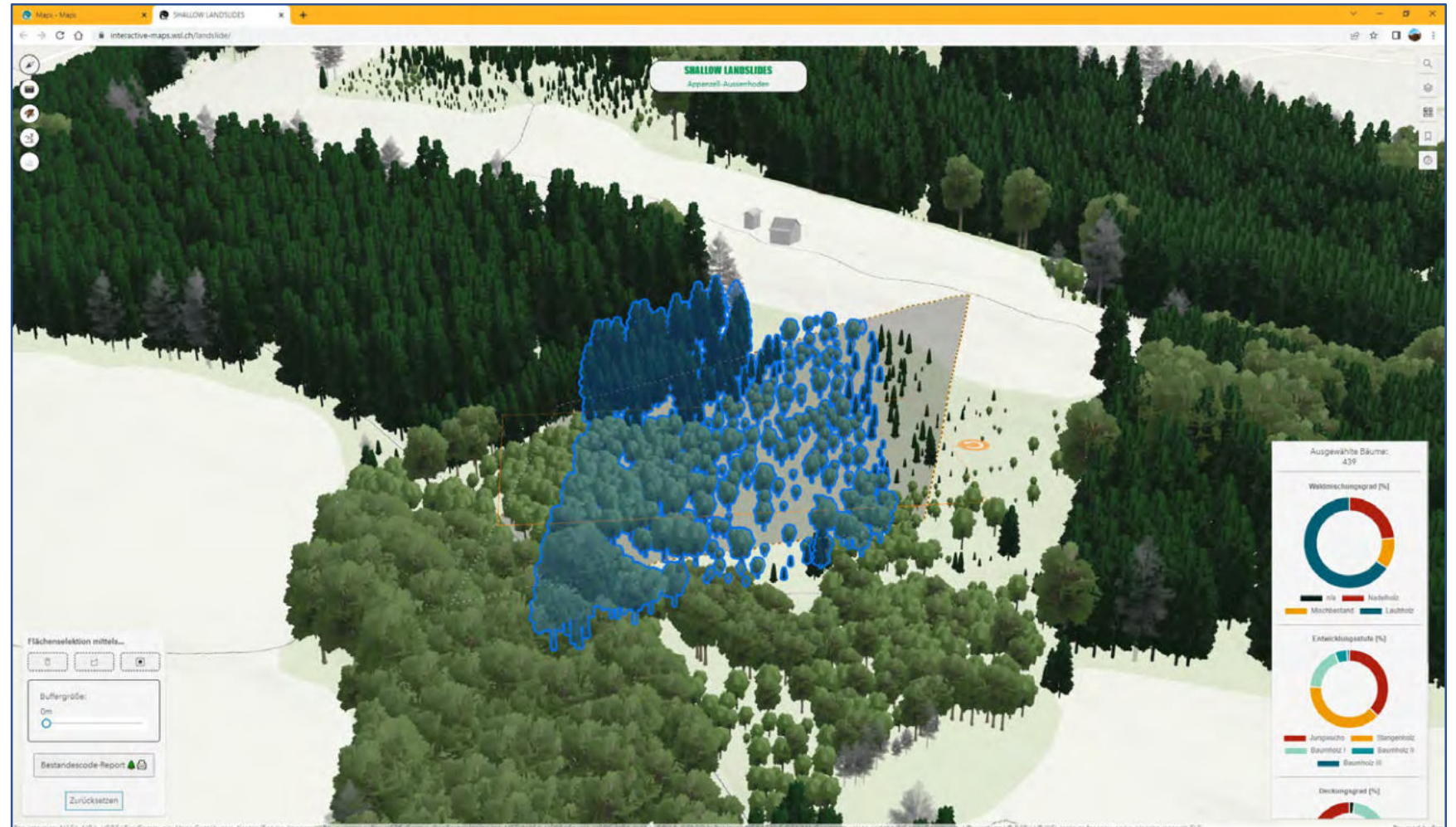
Hier in der Karte sichtbar ist das eben gesetzte 100x100m Quadrat.



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.3.3] Selektion mit wählbaren Flächen, Editierung

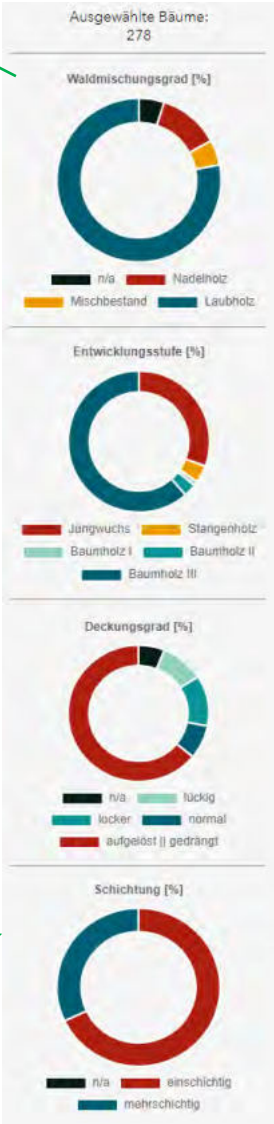
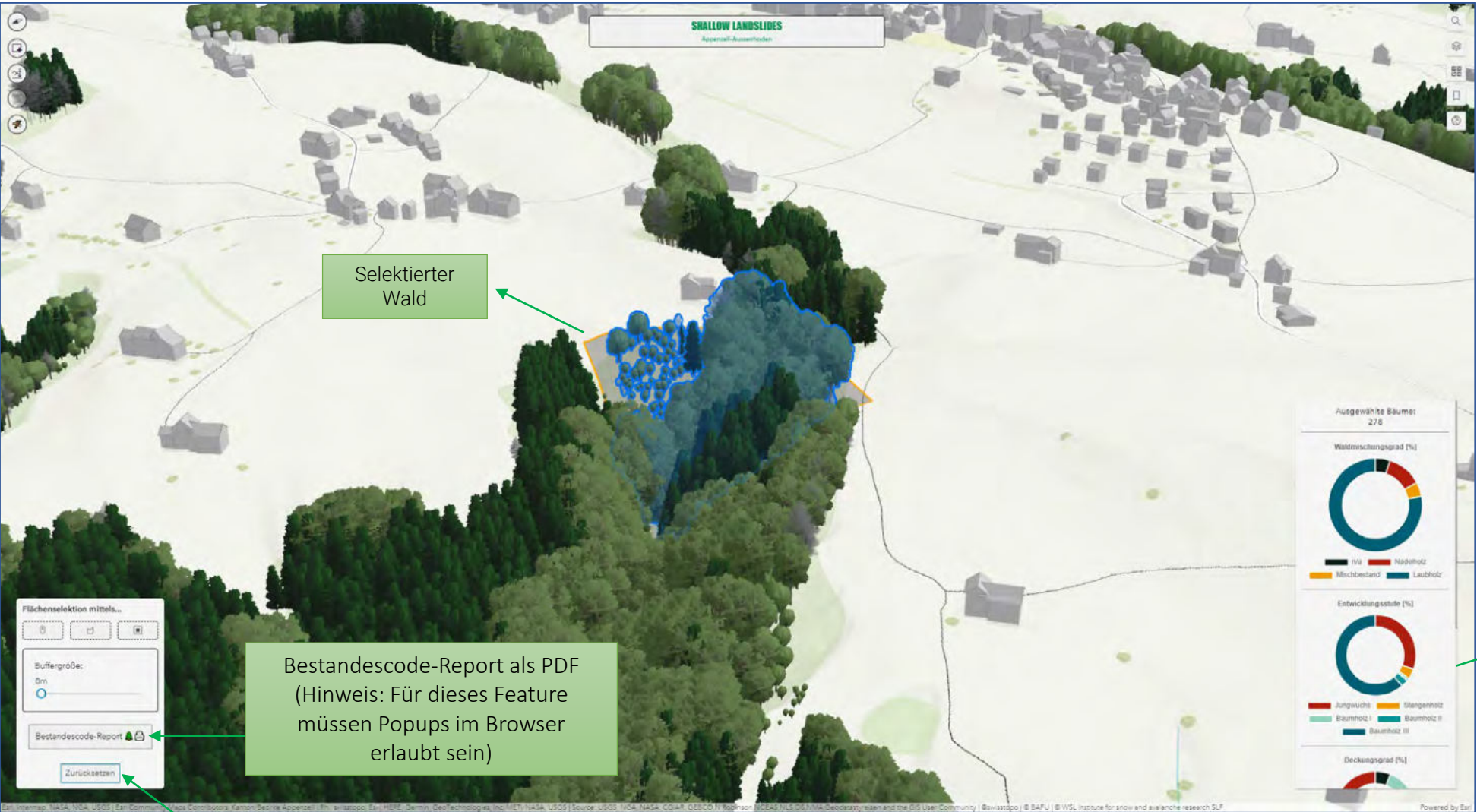
Um die Fläche in die gewünschte Position zu bringen, wird diese in der Karte angeklickt. Nun erscheint ein orangefarbiger Kreis mit einem Rückwärts-Pfeil. Durch ein Hin- und Herziehen des Buttons kann die Fläche rotiert werden. Zudem kann die Fläche selbst mit der Maus an eine neue Position gezogen werden. Es ist auch möglich die Stützpunkte zu verschieben. Hier ist jedoch Vorsicht geboten, weil dann die Seitenlängen verändert werden und evtl. nicht mehr den vorgegebenen Maßen entsprechen.



Widget: Bestandescode-Analyse

[3.4] Generierte Statistiken

Generierte Statistiken der selektierten Fläche in %:
Waldmischungsgrad, Entwicklungsstufe,
Deckungsgrad, Schichtung



Dokumentierte Rutschungen des 2002-er Ereignisses in Appenzell

Auszug aus der Hangmurendatenbank der WSL (<https://hangmuren.wsl.ch/>).

nr	Gemeinde	m.ü.M	USCS	Länge [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Anriss-tiefe [m]	Anrissflä- che [m²]	Volumen [m³]	Φ' [°]	α [°]	Schichtung neu (orig.)	Entwicklung neu (orig.)	Mischung neu (orig.)	Deckung neu (orig.)	Topo- graphie
224	Trogen	890	SM	13.5	9.5	1.6	0.7	80	80	33.6	30	1	3(5)	2	1	8
227	Trogen	795	SM	19.0	11.5	0.5	0.7	120	48	33.6	38	1	2	3	2	6
228	Trogen	800	SM	15.0	9.5	0.5	0.8	105	41	33.6	41	1	3(5)	2	2	6
251	Rehetobel	840	SM	24.5	26.0	1.2	≈ 0	500	220	33.6	35	1	3(4)	1	1	5
255	Rehetobel	800	SM	40.0	15.5	1.2	0.7	425	210	33.6	35	1	3(5)	1	1	9
259	Rehetobel	820	SM	17.0	10.0	1.0	0.6	120	70	33.6	31	1	2	3	2(3)	3
262	Trogen	780	SM	29.0	14.0	0.8	0.7	250	125	33.6	30	1	1	3	3(5)	9
266	Rehetobel	920	SW	21.5	9.0	0.7	0.5	160	80	38.0	32	1	2	1	1	6
267	Wald	900	SM	24.5	17.0	1.0	1.0	300	150	33.6	35	1	3(4)	1	2	6
271	Wald	840	SM	13.5	10.0	0.6	0.3	96	40	33.6	35	1	3(5)	1	2	3
272	Wald	800	SM	11.5	16.0	1.6	1.1	120	120	33.6	32	1	3(5)	1	2(3)	9
273	Trogen	780	CL-ML	19.5	8.5	0.7	0.5	105	41	32.7	34	1	3(5)	2	2(3)	8
274	Trogen	780	CL	71.0	24.0	1.1	0.7	1200	720	30.7	30	1	3(5)	1	1	9
275	Trogen	800	SM	12.0	13.5	1.2	1.0	100	50	33.6	32	1	3(4)	2	1	3
277	Wald	870	SM	25.0	27.0	1.2	1.1	500	300	33.6	31	1	3(4)	1	1	6
281	Rehetobel	820	SC	14.5	10.5	1.1	0.7	80	40	34.8	42	1	3(4)	2	2	1
282	Rehetobel	840	SM	21.0	13.5	1.0	0.7	216	125	33.6	34	1	3	1	2	6
285	Rehetobel	720	SM	20.0	10.0	0.7	0.1	120	45	33.6	38	1	3(5)	1	2	9
286	Rehetobel	830	CL	16.0	14.0	0.9	0.3	144	60	30.7	26	1	3(5)	1	2	9
288	Wald	970	SM	10.0	10.0	1.0	1.2	72	45	33.6	35	1	3(4)	1	2	6
289	Wald	1040	SM	14.0	17.0	1.1	1.5	180	146	33.6	34	1	3(4)	1	1	6
291	Wald	880	CL	14.0	12.0	0.8	0.7	132	60	30.7	30	1	3(5)	1	1	9
292	Wald	900	SM	8.5	10.0	1.1	1.0	64	40	33.6	38	1	3(5)	1	1	6
294	Wald	880	SM	15.0	12.5	1.2	1.5	132	66	33.6	43	1	3(4)	2	2	6
295	Wald	860	SM	11.0	13.5	0.9	0.6	100	50	33.6	44	1	3(5)	2	1	6
296	Wald	860	SM	10.0	6.5	1.3	0.8	45	32	33.6	49	1	3(4)	2	1	3
297	Wald	870	SW	28.5	24.0	1.6	1.5	390	425	38.0	42	1	3(4)	2	3(5)	6
250	Rehetobel	860	SM	24.0	25.0	0.5	1.7	360	150	33.6	40	2	3(5)	1	1	6
276	Wald	850	SM	30.0	15.0	0.7	0.7	390	200	33.6	35	2(3)	4(6)	2	2(3)	6
279	Rehetobel	820	SM	20.0	10.5	1.1	0.5	160	80	33.6	34	2(3)	4(6)	1	2(3)	9
283	Rehetobel	870	GC	18.0	8.5	0.9	0.3	112	48	31.4	34	2(3)	4(6)	3	3(5)	9
287	Rehetobel	845	SM	8.5	9.5	0.8	0.7	72	43	33.6	37	2(3)	4(6)	3	1	9

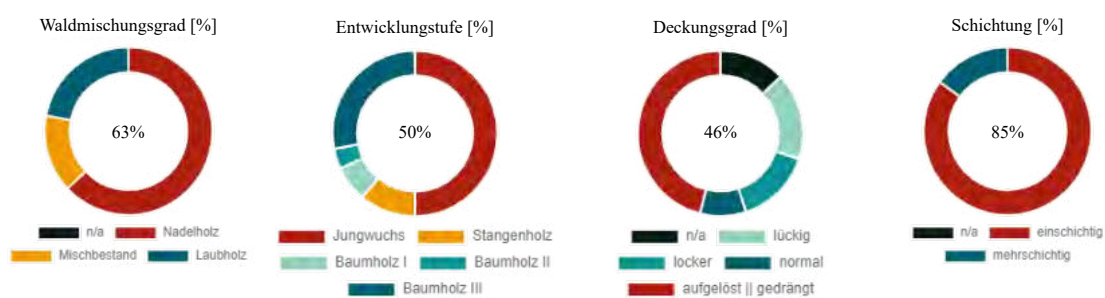
Bestandescode-Report

Appenzell-Ausserrhoden

5.5.2022

Anzahl selektierter Bäume: 46

Fläche in ha: 0.15 | Zentrumsordinate: 2753241, 1253884

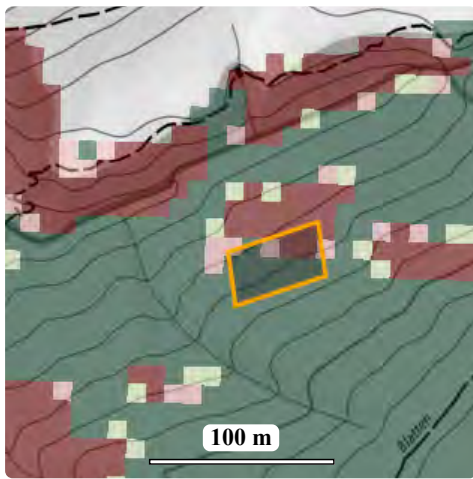


	Waldmischungsgrad
Nadelholz	63 %
Mischbestand	15 %
Laubholz	22 %
n/a	0 %

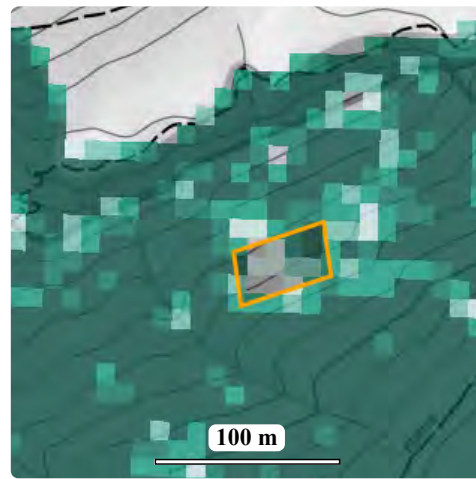
	Entwicklungsstufe
Jungwuchs	50 %
Stangenholz	11 %
Baumholz I	7 %
Baumholz II	4 %
Baumholz III	28 %

	Deckungsgrad
aufgelöst	24 %
lückig	17 %
locker	15 %
normal	9 %
gedrängt	22 %
n/a	13 %

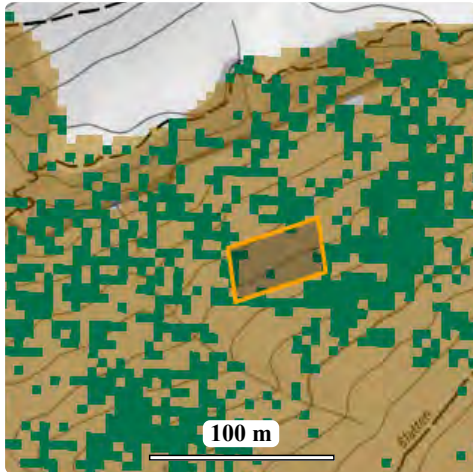
	Schichtung
Einschichtig	85 %
Mehrschichtig	15 %
n/a	0 %



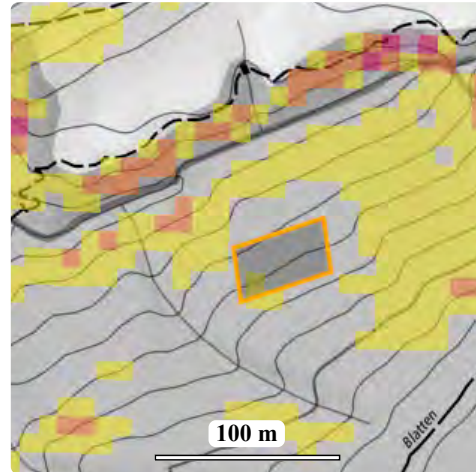
Waldmischungsgrad



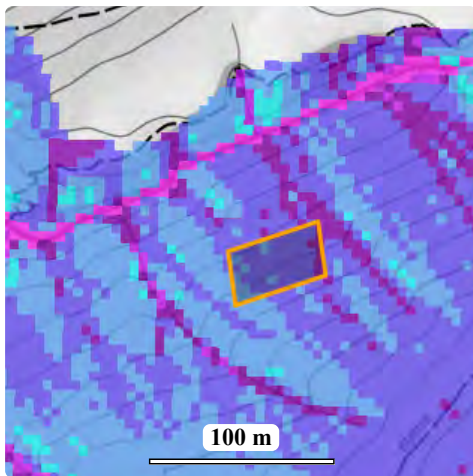
Deckungsgrad



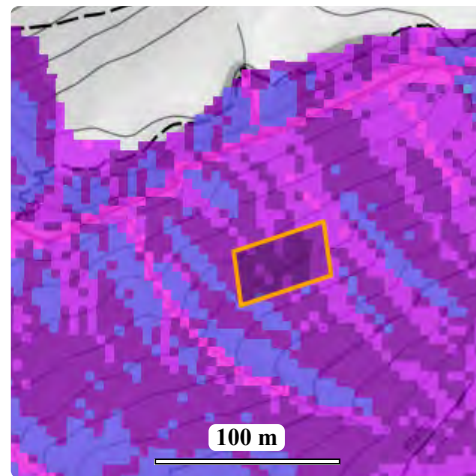
Schichtung



Hangneigung ab 30°



TWI [ungewichtet]



TWI [gewichtet mit Sommer-NS]

Waldmischungsgrad [%]	Deckungsgrad [%]	Schichtung []	Hangneigung [°]	TWI []
0-20 dominant Laubholz	20-40 aufgelöst	einschichtig	30-35°	0-2
20-50 vermehrt Laubholz	40-60 lückig	mehrschichtig	35-40°	2-4
50-80 vermehrt Nadelholz	60-80 locker		40-45°	4-6
80-100 dominant Nadelholz	80-90 normal		> 45°	6-8
	90-100 gedrängt			8-10
				> 10

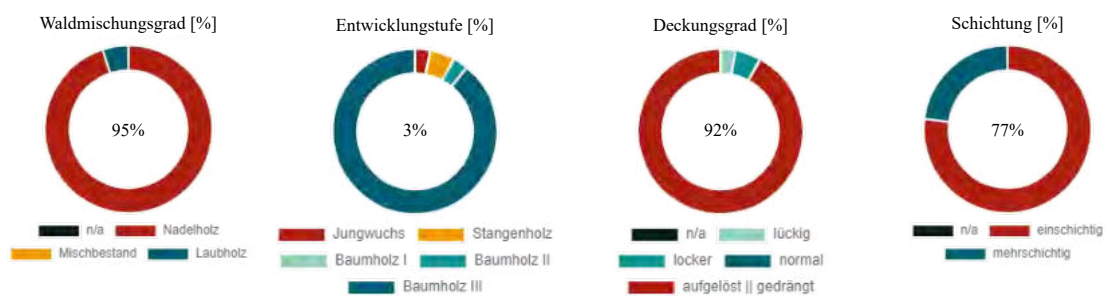
Bestandescode-Report

Appenzell-Ausserrhoden

5.5.2022

Anzahl selektierter Bäume: 39

Fläche in ha: 0.15 | Zentrumskoordinate: 2754566, 1254329

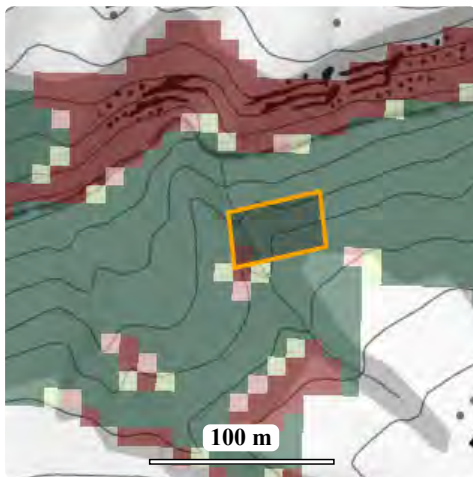


	Waldmischungsgrad
Nadelholz	95 %
Mischbestand	0 %
Laubholz	5 %
n/a	0 %

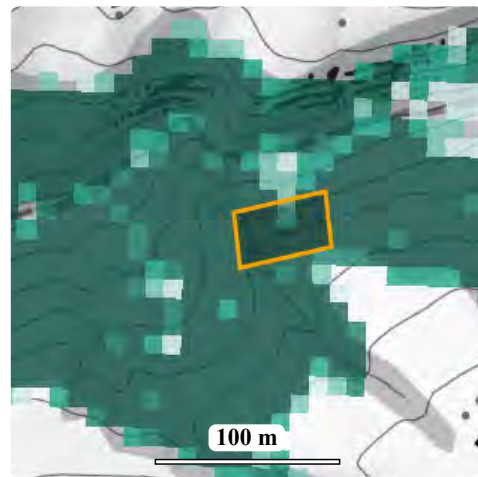
	Entwicklungsstufe
Jungwuchs	3 %
Stangenholz	5 %
Baumholz I	0 %
Baumholz II	3 %
Baumholz III	90 %

	Deckungsgrad
aufgelöst	0 %
lückig	3 %
locker	5 %
normal	0 %
gedrängt	92 %
n/a	0 %

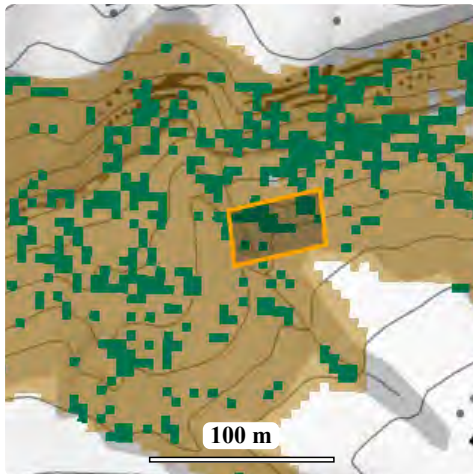
	Schichtung
Einschichtig	77 %
Mehrschichtig	23 %
n/a	0 %



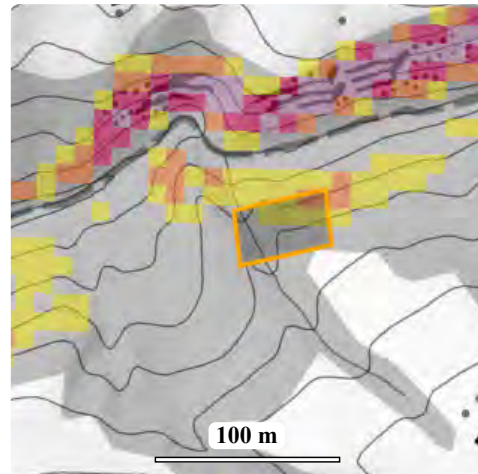
Waldmischungsgrad



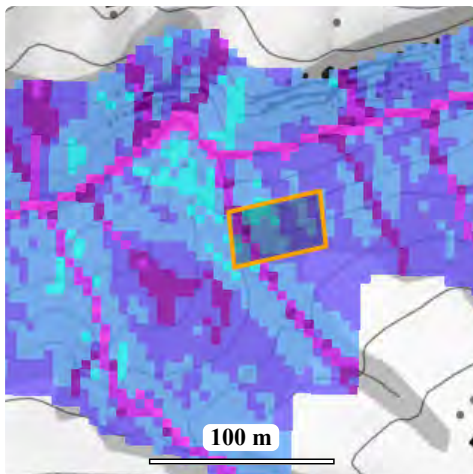
Deckungsgrad



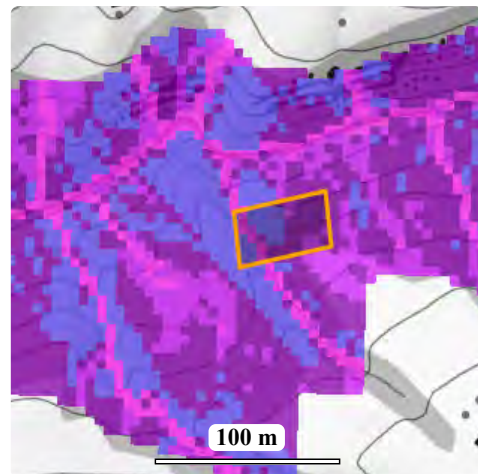
Schichtung



Hangneigung ab 30°



TWI [ungewichtet]



TWI [gewichtet mit Sommer-NS]

Waldmischungsgrad [%]	Deckungsgrad [%]	Schichtung []	Hangneigung [°]	TWI []
0-20 dominant Laubholz	20-40 aufgelöst	einschichtig	30-35°	0-2
20-50 vermehrt Laubholz	40-60 lückig	mehrschichtig	35-40°	2-4
50-80 vermehrt Nadelholz	60-80 locker		40-45°	4-6
80-100 dominant Nadelholz	80-90 normal		> 45°	6-8
	90-100 gedrängt			8-10
				> 10



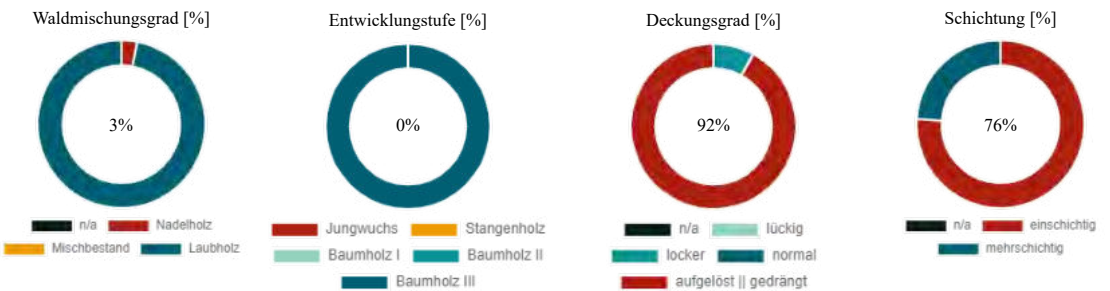
Bestandescode-Report

Appenzell-Ausserrhoden

5.5.2022

Anzahl selektierter Bäume: 38

Fläche in ha: 0.15 | Zentrumskoordinate: 2753851, 1254145

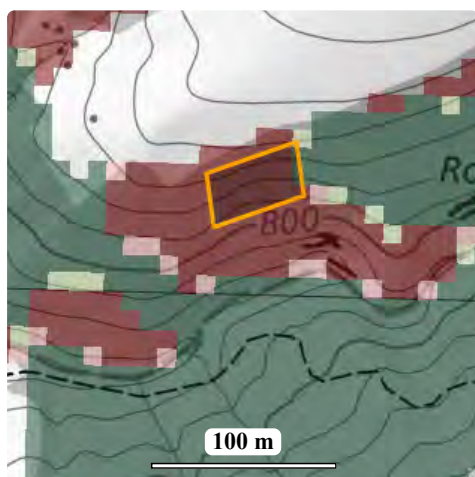


	Waldmischungsgrad
Nadelholz	3 %
Mischbestand	0 %
Laubholz	97 %
n/a	0 %

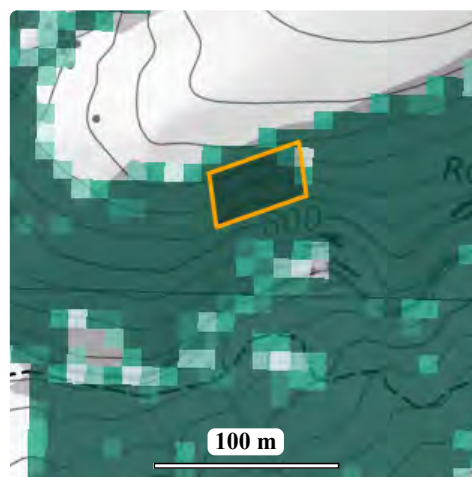
	Entwicklungsstufe
Jungwuchs	0 %
Stangenholz	0 %
Baumholz I	0 %
Baumholz II	0 %
Baumholz III	100 %

	Deckungsgrad
aufgelöst	0 %
lückig	0 %
locker	8 %
normal	0 %
gedrängt	92 %
n/a	0 %

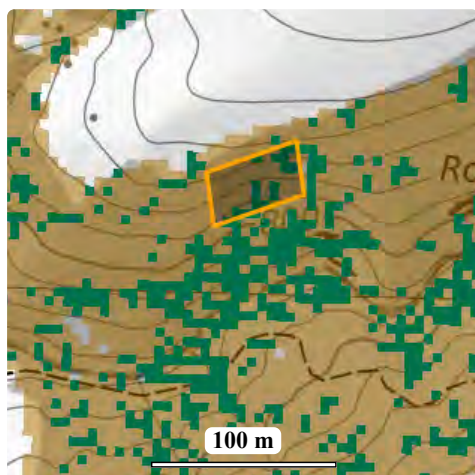
	Schichtung
Einschichtig	76 %
Mehrschichtig	24 %
n/a	0 %



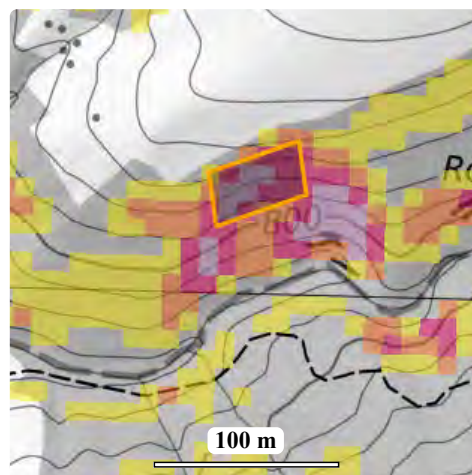
Waldmischungsgrad



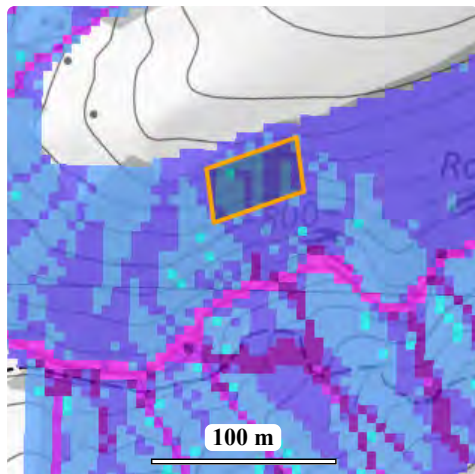
Deckungsgrad



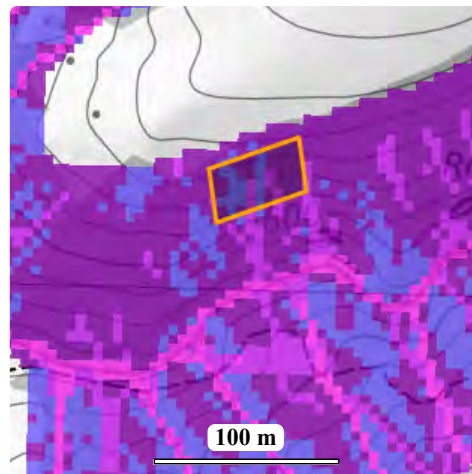
Schichtung



Hangneigung ab 30°



TWI [ungewichtet]



TWI [gewichtet mit Sommer-NS]

Waldmischungsgrad [%]	Deckungsgrad [%]	Schichtung []	Hangneigung [°]	TWI []
0-20 dominant Laubholz	20-40 aufgelöst	einschichtig	30-35°	0-2
20-50 vermehrt Laubholz	40-60 lückig	mehrschichtig	35-40°	2-4
50-80 vermehrt Nadelholz	60-80 locker		40-45°	4-6
80-100 dominant Nadelholz	80-90 normal		> 45°	6-8
	90-100 gedrängt			8-10
				> 10



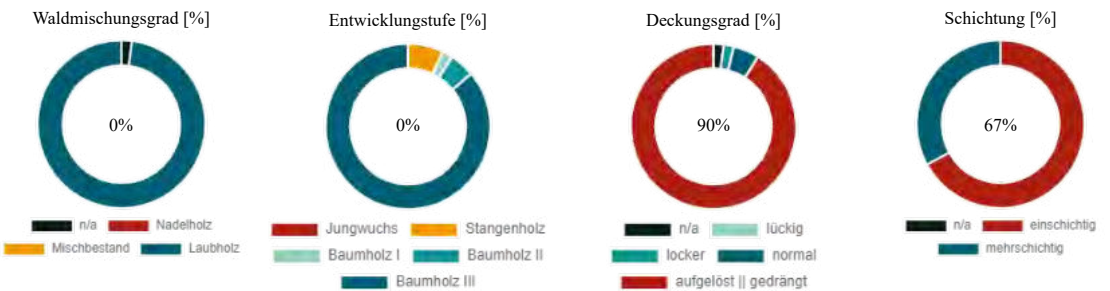
Bestandescode-Report

Appenzell-Ausserrhoden

5.5.2022

Anzahl selektierter Bäume: 42

Fläche in ha: 0.15 | Zentrumskoordinate: 2754557, 1253189

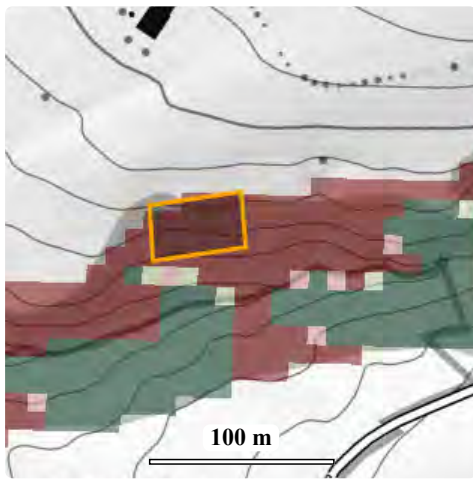


	Waldmischungsgrad
Nadelholz	0 %
Mischbestand	0 %
Laubholz	98 %
n/a	2 %

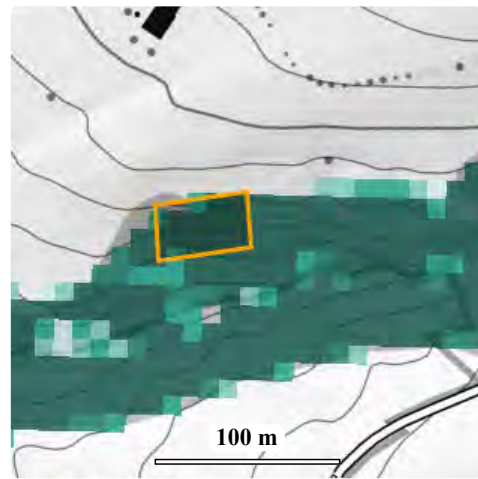
	Entwicklungsstufe
Jungwuchs	0 %
Stangenholz	7 %
Baumholz I	2 %
Baumholz II	5 %
Baumholz III	86 %

	Deckungsgrad
aufgelöst	0 %
lückig	0 %
locker	2 %
normal	5 %
gedrängt	90 %
n/a	2 %

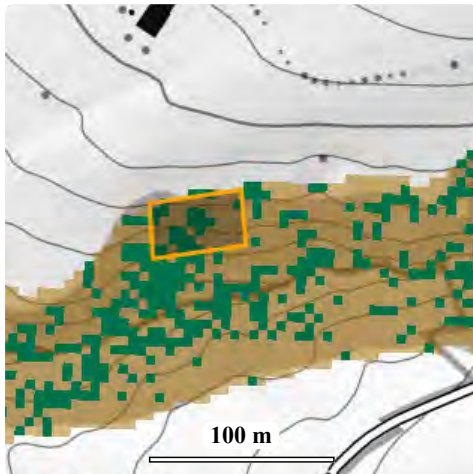
	Schichtung
Einschichtig	67 %
Mehrschichtig	33 %
n/a	0 %



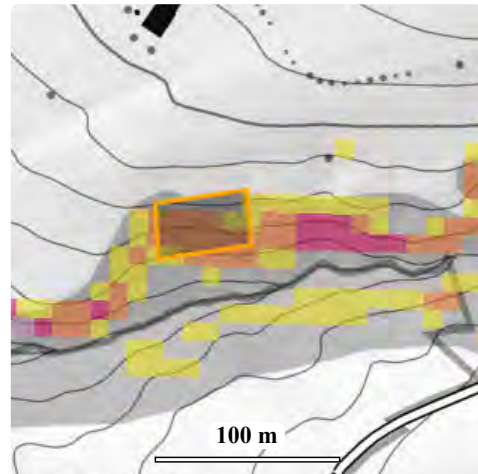
Waldmischungsgrad



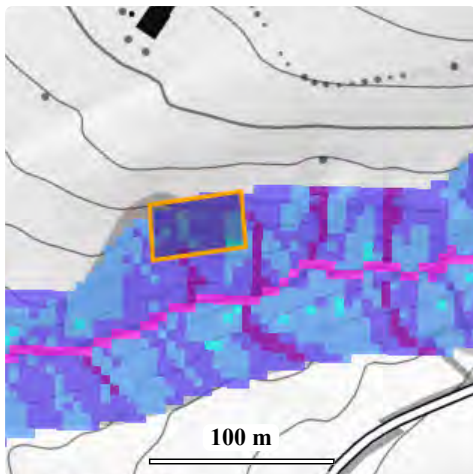
Deckungsgrad



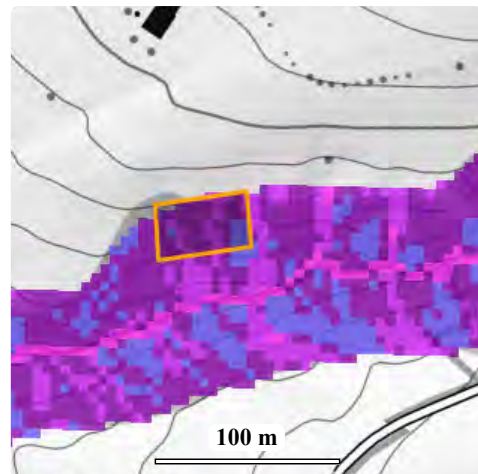
Schichtung



Hangneigung ab 30°



TWI [ungewichtet]



TWI [gewichtet mit Sommer-NS]

Waldmischungsgrad [%]	Deckungsgrad [%]	Schichtung []	Hangneigung [°]	TWI []
0-20 dominant Laubholz	20-40 aufgelöst	einschichtig	30-35°	0-2
20-50 vermehrt Laubholz	40-60 lückig	mehrschichtig	35-40°	2-4
50-80 vermehrt Nadelholz	60-80 locker		40-45°	4-6
80-100 dominant Nadelholz	80-90 normal		> 45°	6-8
	90-100 gedrängt			8-10
				> 10

Schützt der Wald vor Rutschungen?

Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank

Christian Rickli	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)*
Frank Graf	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Peter Bebi	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Alexander Bast	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Bernard Loup	Bundesamt für Umwelt, BAFU (CH)
Brian McARDell	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank

Während Starkregenereignissen kommt es immer wieder zu flachgründigen Rutschungen und Hangmuren mit zum Teil erheblichen Schäden. Unwetteranalysen zeigen, dass im Wald pro Fläche meist weniger Rutschungen als im Freiland ausgelöst werden, was die allgemein anerkannten positiven Wirkungen des Waldes auf die Hangstabilität untermauert. Diese Wirkungen sind jedoch abhängig vom jeweiligen Zustand der Bestockung, und ihre Quantifizierung ist schwierig. Ereignisdokumentationen tragen zu einem besseren Verständnis der massgebenden Prozesse bei. Die dabei gewonnenen Informationen sind nicht nur für die Erstellung von Gefahrenkarten wichtig, sondern leisten auch wertvolle Dienste bei der Bewertung der Schutzwirksamkeit des Waldes. Für den vorliegenden Beitrag wurden Daten aus der Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) hinsichtlich der Wirkung des Waldes auf die Hangstabilität ausgewertet. Aktuell enthält die Datenbank Angaben zu 734 Rutschungen. Von diesen wurden 661 in die Auswertung einbezogen – 356 Rutschungen im Freiland und 305 im Wald. Es zeigt sich, dass in Gebieten mit Neigungen bis 38° im Freiland pro Fläche mehr Rutschungen entstanden sind als im Wald. In noch steileren Gebieten ist eine stabilisierende Waldwirkung nicht mehr erkennbar. Gemäss den statistischen Auswertungen sind die Rutschungen im Wald kleiner als im Freiland und brechen in steileren Lagen an. Allgemein werden die Rutschungen mit zunehmender Hangneigung kleiner. Multivariate Auswertungen weisen auf positive Waldwirkungen beziehungsweise verhältnismässig kleine Rutschungen in älteren und stufigen Bestockungen hin. Negative Effekte zeigen sich insbesondere in unbestockten Flächen und sehr dichten Wäldern. Neben der Bedeutung des Waldzustandes für die Hangstabilität wird im Beitrag auch diskutiert, wie dieser beschrieben werden kann.

Keywords: shallow landslides, statistical analysis, forest condition, database, protection forest
doi: 10.3188/szf.2019.0310

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christian.rickli@wsl.ch

Als spontane Rutschung wird eine Lockergesteinsmasse bezeichnet, die aufgrund eines plötzlichen Verlustes der Scherfestigkeit des Bodens unter Ausbildung einer Gleitfläche schnell abgleitet (AGN 2004). Flachgründige Rutschungen sind gemäss BAFU (2016) weniger als 2 m tief. Bei starker Verflüssigung der Rutschmasse kann das Gemisch aus Lockergestein und Wasser weite Strecken über den Hang als sogenannte Hangmure abfließen; dies im Gegensatz zu Murgängen, die topografisch an ein Gerinne gebunden sind. Neben dem Verlust der Scherfestigkeit kann auch hydraulischer Grundbruch zu Hangmuren führen. Bei Unwetterereignissen entstehen oft zahlreiche flachgründige Rutschungen und Hangmuren mit zum Teil erheblichen

Schadenfolgen (Hilker et al 2009, Rickli et al 2008). Im Hinblick auf die Hangstabilität wird Wald generell positiv beurteilt (z.B. Barik et al 2017, Bathurst et al 2010; Gray 1995; Sidle & Ochiai 2006; Schmaltz et al 2017; Schwarz 2019, dieses Heft). Ereignisdokumentationen in der Schweiz stützen diese Aussage, wurden doch im Wald meist weniger Rutschungen beobachtet als im Freiland, wobei gebietsabhängig auch Ausnahmen existieren (Rickli & Graf 2009). Die Wirkung des Waldes kann in hydrologische (Sättigungsverhältnisse im Boden) und mechanische Einflüsse (Verstärkung durch Wurzeln) unterteilt werden. Für eine gute Bodenstabilität ist dabei eine hohe Diversität in Bezug auf das Alter der Bäume, die Baumarten sowie die horizontale und vertikale



Abb 1 Flachgründige Rutschung in einer lückigen Bestockung in St. Antönien (GR; Unwetter August 2005). Foto: Hansueli Bucher

Bestandesstruktur besonders wichtig (Graf et al 2017). Damit möglichst wenig Rutschungen entstehen, sollten zudem Waldlücken in der Hangfalllinie nicht länger als 20 bis 25 m sein (Moos et al 2016). Insgesamt ist jedoch die Quantifizierung der Schutzwirkung des Waldes schwierig, und es besteht grosser Forschungsbedarf.

Daten und Informationen zu Rutschungen sind äusserst wertvoll, sei es allgemein für ein besseres Verständnis der Rutschprozesse oder für die Beantwortung spezifischer Fragen, zum Beispiel die Bewertung der Waldwirkungen. Zu diesem Zweck wurden im Verlauf der letzten Jahrzehnte in der Schweiz und im benachbarten Alpenraum zahlreiche Rutschungsinventare erstellt (z.B. Damm & Klose 2015, Guzzetti et al 2004, Markart et al 2007, Rickli & Graf 2009). Der Fokus des vorliegenden Artikels richtet sich auf Fragen zur Bedeutung von Zustand und Struktur des Waldes in Bezug auf seine Schutzwirkung gegenüber Rutschungen. Zudem wird untersucht, inwiefern sich

aus den in der Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) erfassten Inventaren Erkenntnisse hinsichtlich einer bezüglich Hangstabilität optimierten Waldpflege ableiten lassen.

Daten und Methoden

Die in der WSL-Datenbank enthaltenen Rutschungen wurden meist ereignisbezogen erfasst. Dies beinhaltet, dass nach einem Unwetter in einer besonders stark betroffenen Region Untersuchungsgebiete ausgeschieden und darin alle Rutschungen mit einem Volumen über einem bestimmten Schwellenwert (meist 30 m³) im Feld dokumentiert werden (Abbildung 1). Zu den standardmässig erfassten Parametern gehören die Abmessungen (z.B. Länge, Breite, Fläche, Tiefe, Volumen), die Topografie, die Standortverhältnisse sowie Angaben zur Vegetation bzw. Landnutzung, zum Rutschmechanismus sowie zum Auslauf der Hangmure. In Bezug auf den Wald werden insbesondere die Schichtung, die Entwicklungsstufe, die Baumartenmischung und der Deckungsgrad der Bestockung (Verhältnis der durch die Kronen überschirmten Fläche zur Gesamtfläche; max. 100%) beurteilt.

Die Bestimmung des Vorkommens (Anzahl Rutschungen pro Fläche) im Wald und im Freiland basiert einerseits auf der Zuordnung der Rutschungen zu Wald oder Freiland aufgrund des Anrisses und andererseits auf der Waldfläche im Untersuchungsgebiet, ermittelt anhand der Waldsignatur auf der Landeskarte 1:25 000. Dabei werden mit Bäumen bestandene Flächen mit einer Oberhöhe von mehr als 3 m (Ausnahme Holzschläge, Schadenflächen und Aufforstungen) mit einem Deckungsgrad von mehr als 60% und Lückengrössen von bis zu 800 m² als Wald taxiert. Alle Flächen ausserhalb des Waldes – also meist landwirtschaftlich oder nicht genutzte Flächen (Siedlungen und Strassen machen in unseren Unter-

Erhebung / Gebiet	Kanton	Gemeinde	Datum Ereignis	Auslösender Niederschlag (mm)	Niederschlagsdauer (h)	Anzahl Rutschungen	Untersuchungsgebiet (km ²)
Sachseln	OW	Sachseln	15.8.1997	150	2	280	8.2
Appenzell	AR	Trogen, Wald und Rehetobel	31.8.–1.9.2002	120	9	100	10.2
Napf	BE	Trub	15.–16.7.2002	60	3	64	2.5
Surselva	GR	Sumvitg	14.–16.11.2002	252	63	34	3.2
Entlebuch	LU	Flühli	18.–23.8.2005	269	72	91	5.1
St. Antönien	GR	St. Antönien	18.–23.8.2005	185	72	69	4.7
Napf	BE	Trub	18.–23.8.2005	241	72	58	1.6
Eriz	BE	Horrenbach-Buchen	4.7.2012	80	2	38	9.5
Total						734	45.0

Tab 1 Derzeitiger Datenumfang der WSL-Rutschungsdatenbank und ausgewählte Informationen zu den entsprechenden Erhebungen. Von den 734 in der Datenbank erfassten Rutschungen konnten 661 für die Vergleiche zwischen Waldrutschungen (305) und Freilandrutschungen (356) und 252 Waldrutschungen für die Analyse des Waldzustands verwendet werden.

Schichtung		Entwicklungsstufe		Mischung		Deckungsgrad (DG)	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt	xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
1xxx	einschichtig	x1xx	Jungwuchs / Dichtung	xx1x	>80% Nadelholz	xxx1	gedrängt (DG ca. 90%)
2xxx	mehrschichtig	x2xx	Stangenholz	xx2x	Mischbestand	xxx2	normal (DG ca. 80%)
3xxx	stufig	x3xx	Baumholz I (BHD 20–35 cm)	xx3x	>80% Laubholz	xxx3	locker (DG ca. 60%)
		x4xx	Baumholz II (BHD 35–50 cm)			xxx4	lückig (DG ca. 40%)
		x5xx	Baumholz III (BHD >50 cm)			xxx5	aufgelöst (DG ca. 20%)
		x6xx	stufiger Bestand				

Tab 2 Bestandescharakteristika: Informationen des vierstelligen Bestandescodes. BHD: Brusthöhendurchmesser.

suchungsbieten schätzungsweise nur wenige Prozent aus) – werden dem Freiland zugewiesen.

Alle Informationen zu den Rutschungen sind in einer Datenbank abgelegt, die gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) erarbeitet wurde. Zur Datenbank existiert eine Web-Applikation,¹ auf der die Angaben eingesehen werden können und die den Export ausgewählter Informationen erlaubt. Für eine nachvollziehbare Beurteilung und Erfassung der Daten im Feld existiert eine Anleitung (WSL & BAFU 2018).

Die WSL-Rutschungsdatenbank umfasst derzeit Informationen zu insgesamt 734 flachgründigen Rutschungen und Hangmuren, die sich während acht Ereignissen in verschiedenen Gebieten der Schweiz ereigneten (Tabelle 1). Die Daten der verschiedenen Erhebungen unterscheiden sich nicht nur in Bezug auf die Geologie und die Topografie, sondern auch hinsichtlich des auslösenden Niederschlages.

Im vorliegenden Artikel werden Ergebnisse erster Auswertungen der Datenbank vorgestellt. Dazu gehört auch ein Vergleich zwischen Wald- und Freilandrutschungen in Bezug auf Hangneigung, Höhenlage und Abmessungen mithilfe des Wilcoxon-Rangsummentests. Der Einfluss von Hangneigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen wird mithilfe robuster linearer Regression

mit Transformation der Zielvariablen (Logarithmus, Quadratwurzel) evaluiert. Für die Überprüfung des Einflusses der Bestandesmerkmale Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung und Deckungsgrad sowie der verschiedenen Ereignisse auf die Grösse der Rutschungen wird der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Im Weiteren werden die Daten mithilfe multipler Faktorenanalyse (MFA) ausgewertet (z.B. Husson et al 2017). Diese Methode der Hauptkomponentenanalyse erlaubt, die Gruppenstruktur von Datensätzen mit numerischen und kategoriellen Variablen in der Auswertung zu berücksichtigen. Im vorliegenden Artikel sind dies die Gruppe der numerischen Variablen ausgewählter Rutschungscharakteristiken (Höhenlage, Hangneigung, Rutschungsfläche und -volumen) und jene der kategoriellen Variablen des Bestandescodes (Schichtung, Entwicklung, Mischung, Deckungsgrad; Tabelle 2) sowie der Unwetterereignisse. Alle Analysen erfolgten mit dem Softwarepaket R 3.5.2 (R Core Team 2018).

Ergebnisse

Vorkommen

Rutschungen wurden in Gebieten mit Neigungen von 19 bis 54° ausgelöst. Im Freiland liegt das maximale Vorkommen (Anzahl Rutschungen pro Fläche) bei 34 bis 36° und im Wald bei 38 bis 40° (Abbildung 2). In Gebieten mit Neigungen bis 38° wurden im Freiland mehr Rutschungen pro km² beobachtet als im Wald, in steileren Gebieten ereigneten sich im Wald mehr Rutschungen als im Freiland.

Eigenschaften der Rutschungen

Der Vergleich zwischen den Wald- und Freilandrutschungen (n = 661, davon 305 im Wald und 356 im Freiland) ergab, dass Rutschungen im Wald in tieferen Lagen und in steilerem Gelände auftraten als im Freiland. Bei beiden Vergleichen unterscheiden sich Mittelwerte und Median signifikant (Tabelle 3). Die Differenzen (Δ Median) waren mit 113 m bezüglich Höhenlage und 4° bezüglich Neigung beträchtlich. Waldrutschungen waren zudem weniger breit und kleinvolumiger als Freilandrutschungen.

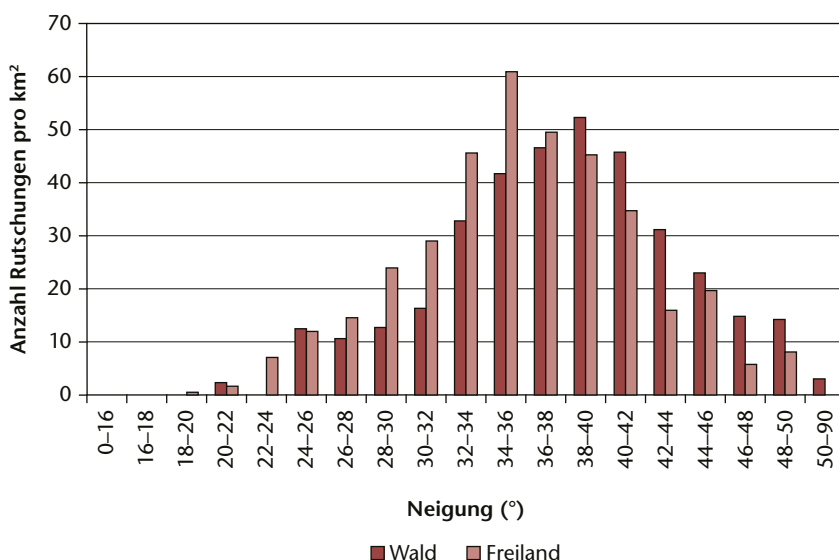


Abb 2 Vorkommen von Rutschungen im Wald und im Freiland pro Fläche in Abhängigkeit der Hangneigung in den untersuchten Gebieten (Tabelle 1).

¹ <https://hangmuren.wsl.ch/> (28.8.2019)

Variable	p-Wert	Vergleich	Δ Median
Höhe (m ü.M.)	0.0019	W < F	113
Länge (m)	0.7964	–	0.2
Breite (m)	0.0053	W < F	0.5
Tiefe (m)	0.0558	W < F	0
Fläche (m ²)	0.2099	–	12
Volumen (m ³)	0.0149	W < F	14
Neigung (°)	0.0000	W > F	4

Tab 3 Vergleich verschiedener Variablen der Rutschungen im Wald (W) und im Freiland (F); $n = 661$, Wilcoxon-Rangsummentest. *p*-Wert fett = signifikanter Unterschied, kursiv = Trend ($0.1 > p\text{-Wert} > 0.05$), in normaler Schrift = nicht signifikant und kein Trend.

Sie waren tendenziell auch weniger tief. Werden die verschiedenen Ereignisse und Gebiete in die Analyse einbezogen, ergeben sich allerdings teilweise davon abweichende Resultate. Während Breite, Fläche und Volumen bei den meisten Erhebungen (Tabelle 1) im Wald kleiner waren als im Freiland, wurden zum Beispiel für die Tiefe und das Volumen der Waldrutschungen in Sachseln signifikant grössere Werte gemessen. Bei den Inventaren in den Gemeinden Trogen, Sumvitg und St. Antönien ergab sich kein Neigungsunterschied zwischen Wald- und Freilandrutschungen. Und schliesslich lagen die Waldrutschungen bei den Inventaren Trub 2002 und St. Antönien in höheren Lagen als die Freilandrutschungen.

Einfluss von Neigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen

Zwischen der Neigung und den Abmessungen ergab sich sowohl bei den Rutschungen im Wald ($n = 305$) als auch im Freiland ($n = 356$) ein signifikanter negativer Zusammenhang ($p\text{-Wert} < 0.05$). Mit zunehmender Neigung nahm beispielsweise das Vo-

lumen der Rutschmasse ab. Bezüglich der Tiefe ergab sich bei den Waldrutschungen nur ein negativer Trend ($0.1 > p\text{-Wert} > 0.05$), bei den Freilandrutschungen war der negative Zusammenhang (je steiler desto flachgründiger) jedoch signifikant ($p\text{-Wert} < 0.05$). Im Gegensatz dazu konnte zwischen der Höhenlage und den Abmessungen der Rutschungen kein Zusammenhang nachgewiesen werden. Weiter ergab sich zwischen der Höhenlage und der Neigung der Freilandrutschungen ein signifikant positiver Zusammenhang (die Neigung nahm mit zunehmender Höhenlage zu), bei den Waldrutschungen konnte diesbezüglich kein Einfluss festgestellt werden.

Einfluss von Waldstruktur und Ereignis

In Abbildung 3 sind beispielhaft einige Ergebnisse zu den Auswirkungen der kategoriellen Variablen Waldstruktur und Ereignis auf die Rutschungsflächen und -volumina dargestellt. Bei kleinen Abmessungen kann vermutet werden, dass sich der entsprechende Faktor positiv auf die Stabilität auswirkt. Verhältnismässig kleine Rutschungsflächen (Abbildung 3a) ergaben sich bei einschichtigen Beständen (Schichtung 1; Codes siehe Tabelle 2), Bestockungen mit grossen Bruthöhendurchmessern und stufiger Struktur (Entwicklungsstufen 5 und 6) sowie bei gemischten Wäldern und Laubwäldern (Mischungen 2 und 3) mit lockerem Kronenschluss (Deckungsgrad 3). In Bezug auf das Rutschungsvolumen (Abbildung 3b) ergaben sich ähnliche Zusammenhänge für Schichtung und Entwicklungsstufe, jedoch unterschiedliche in Bezug auf die Mischung, indem in gemischten Bestockungen Rutschungen mit vergleichsweise grossen Volumen entstanden. Besonders grosse Rutschungen entstanden beim Ereignis 1997 in Sachseln. Die vergleichsweise kleinen Volumina bei unbestockten Flächen stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen der multivariaten Auswertungen (siehe Abbildung 4 und Bemerkungen in der Diskussion).

Multivariate Auswertung

Mit der multiplen Faktorenanalyse konnte ein sehr hoher Anteil von insgesamt 76% der Streuung in den Daten durch die erste (49%) und die zweite Hauptkomponente (27%) erklärt werden (Abbildung 4). In Richtung der ersten Hauptkomponente, die den Zusammenhang der kategoriellen Variablen mit der Fläche und dem Volumen der Rutschung verdeutlicht, zeigte sich, dass Rutschungen in unbestockten Gebieten (Code 0 bei allen Waldstrukturparametern) die grössten Flächen und Volumen aufwiesen. Zudem waren die Abmessungen von Rutschungen in jüngeren Bestockungen grösser als in älteren (Entwicklungsstufen 5 und 6). Grössere Rutschungsflächen und -volumen fanden sich zudem auch in gedrängten Beständen mit Deckungsgrad 1, während die Rutschungen in Beständen mit den

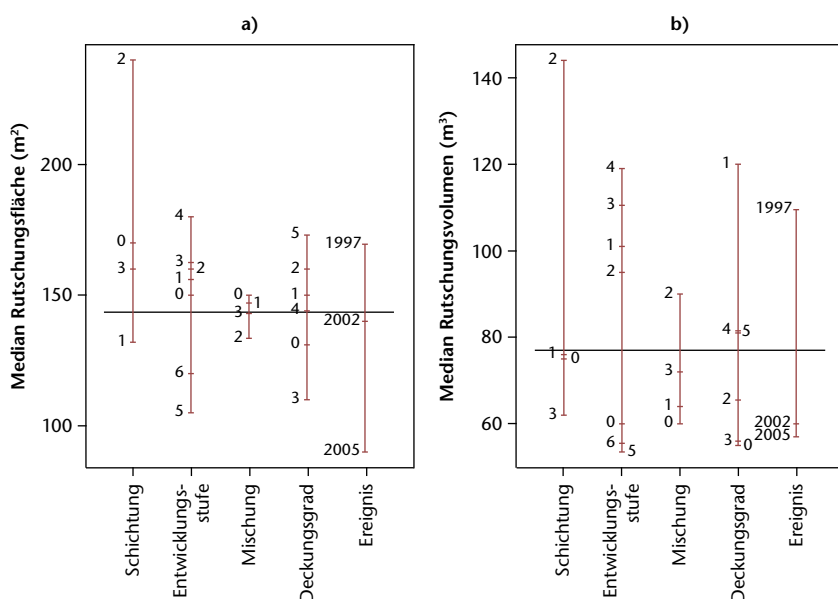


Abb 3 Darstellung von univariaten Zusammenhängen zwischen den Bestandescharakteristika (siehe Tabelle 2) Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung und Deckungsgrad sowie dem Ereignis ($n = 252$) und dem Median der Rutschungsfläche (a) bzw. dem Rutschungsvolumen (b). Horizontale Linie: Median der verschiedenen Einflussgrössen.

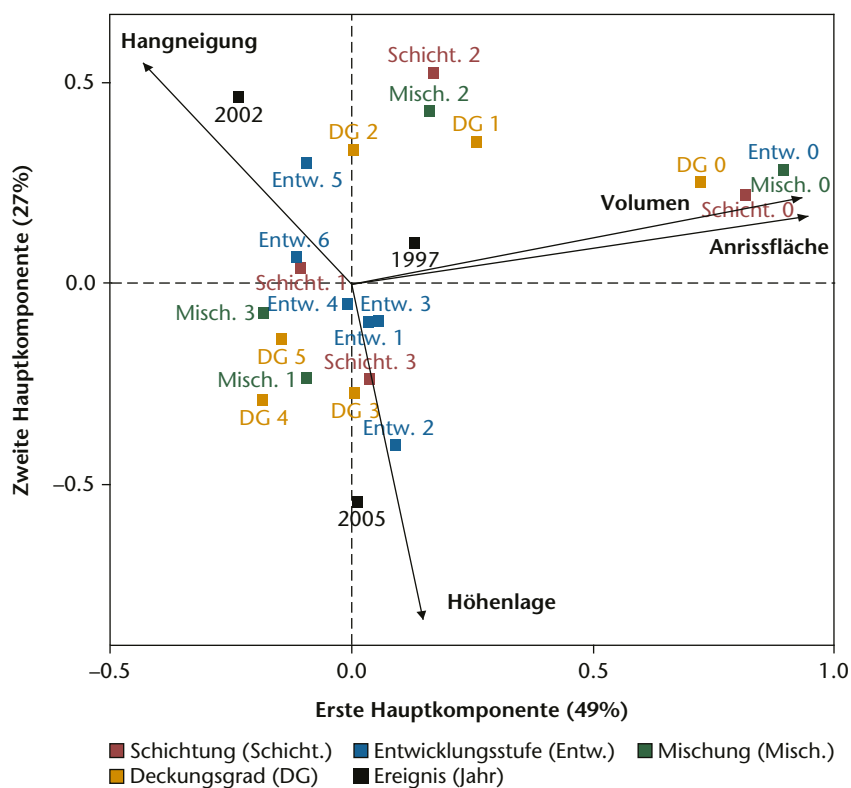


Abb 4 Erste und zweite Hauptkomponente der multiplen Faktorenanalyse von Wald-rutschungen mit den numerischen Variablen Volumen, Fläche, Höhenlage und Hangneigung, den Waldstrukturparametern (Tabelle 2) sowie dem Faktor Ereignis ($n = 252$).

«vorteilhaften» Deckungsgraden 2 und 3 verhältnismässig klein waren. Rutschungen in lückigen und aufgelösten Beständen mit Deckungsgrad 4 und 5 trennten sich noch besser von solchen in unbestockten und gedrängten Flächen (Deckungsgrad 0 und 1) ab und umfassten entsprechend noch kleinere Rutschungsflächen und -volumen. Letzteres Ergebnis kann jedoch auch darauf zurückgeführt werden, dass diese Stufen im Vergleich zu den «vorteilhaften» Stufen (normaler und lockerer Deckungsgrad) eine hohe Korrelation zu Rutschungen in steilen Hochlagen haben, wo die Bodenmächtigkeit geringer ist. Schliesslich wiesen die Rutschungen der Ereignisse 1997 und 2005 vergleichsweise grosse Abmessungen auf.

In Richtung der zweiten Hauptkomponente, welche die Verhältnisse in Bezug auf die Höhenlage widerspiegelt, zeigte sich, dass Rutschungen in lockeren bis aufgelösten Beständen (Deckungsgrad 3, 4, 5) erst in höheren Lagen auftraten, während Wälder mit dichterem Baumbestand (Deckungsgrad 1 und 2) bereits in tieferen Lagen rutschgefährdet waren. Stufige Bestockungen (Schichtung 3) und auch Nadelholzbestände (Mischung 1) waren vor allem in höheren Lagen, wo sie vorherrschen, anfällig auf Rutschungen. Dagegen waren Mischbestände (Mischung 2), die eher in tieferen Lagen vorkommen, sowie ältere Bestände (Entwicklungsstufen 5 und 6) in höheren Lagen weniger stark von Rutschungen betroffen. Schliesslich waren jüngere Bestände (Entwicklungsstufen 1 bis 3) insbesondere in höheren Lagen rutsch-

anfällig. Die Rutschungen der Ereignisse 2005 lagen in vergleichsweise höheren Lagen. Allgemein ist festzustellen, dass sich die Ereignisse 1997, 2002 und 2005 in Bezug auf die Abmessungen, Höhenlage und Hangneigung deutlich unterscheiden.

Diskussion

Ereignisdokumentation und Vorkommen von Rutschungen

Unsere Erhebungen zeigen, dass Rutschungen sowohl im Wald als auch im Freiland entstehen. Die geringere Anzahl Rutschungen im Wald verglichen mit dem Freiland in flacheren Lagen kann mit einer intensiveren Durchwurzelung sowie der höheren Vielfalt bezüglich Wurzelmorphologie und vertikaler Wurzelverteilung begründet werden. Bei Neigungen von mehr als 38° werden jedoch gemäss den vorliegenden Resultaten die Grenzen der stabilisierenden Waldwirkung erkennbar: An sehr steilen Hängen ereignen sich pro Fläche sogar mehr Rutschungen im Wald als im Freiland. Dieser Zusammenhang wurde bereits beim Ereignis von Sachseln erkannt (Rickli 2001) und wird nun bei Einbezug der weiteren Inventare bestätigt. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch die Tatsache, dass der Wald in steilen und damit rutschgefährdeten Lagen meist stärker vertreten ist als das Freiland, da sich dort die landwirtschaftliche Nutzung weniger lohnt. Zudem werden die Wälder an sehr steilen Hängen aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit meist weniger gepflegt, und sie befinden sich oft auch in höheren und unwirtschaftlichen Gebieten, wo auch die flachwurzelnde und störungsanfällige Fichte (Windwurf, Borkenkäfer) besonders stark vertreten ist.

Die Ergebnisse in Abbildung 2 erlauben per se keine Aussagen zum Einfluss des Waldzustandes auf die Hangstabilität. Bei den Untersuchungen der Rutschungen in Sachseln wurden zu diesem Zweck ausgewählte Kriterien der Wegleitung Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS; Frehner et al 2005) beigezogen und der Waldzustand flächendeckend mithilfe von Luftbildern beurteilt. Damit war es möglich, das Vorkommen von Rutschungen in verschiedenen Zustandskategorien zu ermitteln (Rickli 2001). Für die anderen Perimeter war das leider nicht möglich. Eine Option für eine flächenhafte Zuordnung des Waldzustandes bei künftigen Analysen besteht in der Verwendung und Interpretation von Vegetationshöhenmodellen (Planzer 2018, Ginzler & Hobi 2016).

Unterschiede zwischen Rutschungen im Wald und im Freiland

Die Tatsache, dass Waldrutschungen kleiner waren als Rutschungen im Freiland, kann als stabilisierender Effekt einer intensiveren und tiefergrei-

fenden Durchwurzelung im Wald interpretiert werden. Diese Wirkung zeigt sich, obschon Rutschungen im Wald an steileren Hängen anbrachen als im Freiland, wo die Anbruchswahrscheinlichkeit aus bodenmechanischer Sicht eigentlich grösser wäre. Waldrutschungen entstanden im Vergleich zu Rutschungen im Freiland vermehrt in tieferen Lagen, die allgemein mit grösseren Bodenmächtigkeiten in Verbindung gebracht werden. Dies ist jedoch in den Ergebnissen zur Tiefe der Rutschungen nicht erkennbar. Waldrutschungen waren nämlich tendenziell weniger mächtig und umfassten signifikant weniger Volumen als Freilandrutschungen. Diese Unterschiede für den Gesamtdatensatz können sich allerdings bei Betrachtung der einzelnen Unwetterereignisse teilweise ins Gegenteil drehen. So wurden beispielsweise bei den Erhebungen von Sachseln im Wald grössere Rutschungsvolumen als im Freiland festgestellt (Rickli 2001). Mögliche Gründe dafür sind unterschiedliche Stichprobengrössen, andere Topografie und Geologie sowie insbesondere auch die spezifische Niederschlagsgeschichte (Menge, Dauer, Intensität, Vorgeschichte; Tabelle 1).

Einfluss von Neigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen

Zwischen der Neigung der Rutschfläche und den Abmessungen der Rutschung ergaben sich mehrheitlich signifikante Korrelationen: Je grösser die Neigung, desto kleiner waren die Abmessungen. Dies stimmt mit dem Ergebnis überein, dass sich Waldrutschungen eher in steilerem Gelände als Freilandrutschungen ereigneten, jedoch kleiner waren (Tabelle 3). Dass die Abmessungen mit zunehmender Hangneigung kleiner werden, ist auch in Andreu et al (2002) dokumentiert und lässt sich unter anderem mit geringeren Mächtigkeiten der Böden, einem oberflächennaheren Felsverlauf und dem tendenziell grobkörnigeren Bodenmaterial der hier erfassten Gebiete in steilen Lagen erklären. Entgegen unseren Vermutungen konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Höhenlage und den Abmessungen festgestellt werden – möglicherweise aufgrund einer zu geringen Spannweite der betroffenen Höhenlagen. Zudem nahm die Neigung nur bei Freilandrutschungen mit zunehmender Höhenlage zu, nicht jedoch bei Waldrutschungen. Weiter ist zu bemerken, dass sich je nach Gebiet und Ereignis im Detail unterschiedliche Korrelationen ergaben. Wie bereits früher erwähnt, ist dieses Ergebnis höchstwahrscheinlich mit der Anzahl Rutschungen, den Niederschlagscharakteristika und der Topografie zu begründen.

Einfluss der Waldstruktur

Die verschiedenen statistischen Analysen ergaben mehrheitlich positive Effekte beziehungsweise kleinere Rutschungen bei älteren Beständen (starkes

Baumholz und stufige Bestockung). Dies entspricht den Empfehlungen von NaiS und wurde auch in Graf et al (2017) als günstig in Bezug auf die Hangstabilität erachtet. Negative Effekte ergaben sich insbesondere bei unbestockten Flächen oder bei zu hohem Deckungsgrad. Auch diese Aspekte werden in NaiS als nachteilig aufgeführt, denn eine ungünstige BHD-Streuung, kurze Kronen und ein hoher Schlankheitsgrad, die oft aufgrund von zu hohem Deckungsgrad beobachtet werden, sind gemäss den Empfehlungen möglichst zu vermeiden (vgl. auch Bebi et al 2019, dieses Heft). Andererseits sollen Bestandeslücken eine maximale Grösse von 6 a nicht überschreiten. Die Problematik von Bestandeslücken im Zusammenhang mit der Hangstabilität lässt sich unter anderem damit erklären, dass in Flächen ohne Baumbestand die verstärkende Wirkung durch das Wurzelwerk fehlt, was sich insbesondere in der Hangfalllinie negativ auswirkt (Moos et al 2016). Es existiert umfangreiche Literatur, wonach in Schadenflächen beziehungsweise einige Jahre nach natürlichen und anthropogenen Störungen wie Windwurf, Insektenkalamitäten oder Holzschlag vermehrt Rutschungen vorkommen (z.B. Bebi et al 2016, Rickli 2002, Watson et al 1999). Um die stabilisierende Wirkung des Waldes zu fördern, sollte mit geeigneten Pflegemassnahmen auf eine diverse Struktur mit ausreichend Stabilitätsträgern und verschiedenen Baumarten hingewirkt werden. Dadurch kann auch die Resilienz gegenüber Störungen erhöht werden. Besonders wichtig ist dabei die Verjüngung des Waldes, denn ausreichende und gesicherte Verjüngungsansätze unter dem Altbestand verkürzen bei Bestandesschäden die bezüglich Hangstabilität kritische Jungwaldphase deutlich.

Neben Aspekten, die mit den Empfehlungen in NaiS übereinstimmen, ergaben sich jedoch auch Unstimmigkeiten. So wurden beispielsweise in mehrschichtigen Bestockungen grössere Rutschungsvolumen und -flächen als in einschichtigen Bestockungen dokumentiert (Abbildung 3). Ebenso resultierten unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen auf Volumen oder Fläche, indem sich gemischte Bestockungen positiv bezüglich der Fläche, jedoch negativ auf das Volumen auswirkten. Fragen bestehen auch in Bezug auf die Reihenfolge der Stufen, indem beispielsweise die «benachbarten» Entwicklungsstufen Baumholz 2 und Baumholz 3 diametral andere Abmessungen ergaben, nämlich in Baumholz 2 die grössten und in Baumholz 3 die kleinsten. Weiter sind für Rutschungen in unbestockten Flächen in Abbildung 4 (multivariate Auswertung) jeweils die grössten Abmessungen verzeichnet, in Abbildung 3 (univariate Auswertung) jedoch nicht. Diese Ergebnisse weisen nicht nur auf Herausforderungen hinsichtlich Auswertemethodik hin, sondern auch auf die Frage, wie gut mit den vier Strukturparametern Schichtung, Entwicklungsstufe,

Mischung und Deckungsgrad der Zustand des Waldes hinsichtlich der Rutschungsanfälligkeit bewertet werden kann. Der Bestandscode (Tabelle 2) ist ein viel benutztes und einfaches Verfahren für die Charakterisierung eines Bestandes und kann vor Ort im Bestand oder vermehrt auch mittels Fernerkundung angewendet werden. Allerdings genügt er für die Beurteilung der Hangstabilität nicht vollends. Zu klären ist, welche Bestandescharakteristika entscheidend sind und wie diese im Bestand exakt angesprochen werden können. Zudem muss nach Wegen gesucht werden, um die hinsichtlich Durchwurzelungsdiversität wichtige Baumartenzusammensetzung besser in die Bewertung einbeziehen zu können. Eine weitere Ursache dafür, dass die Auswertungen betreffend Strukturparameter nicht durchwegs eindeutig und nach herkömmlichen Vorstellungen ausfielen, liegt vermutlich darin, dass neben dem Waldzustand auch andere Faktoren die Auslösung von Rutschungen entscheidend beeinflussen. Dazu zählen unter anderem Grundfaktoren wie die Topografie und die Geologie oder Förderfaktoren wie beispielsweise Vernässungen oder defekte Drainagen.

Schlussfolgerungen

Mit der WSL-Rutschungsdatenbank besteht eine Grundlage, mit der aus Rutschungsereignissen wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können. Dank den im Gelände erfassten Informationen können nicht nur der Auslauf der Hangmuren, sondern auch Einflussfaktoren wie Geologie und Topografie auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen oder – wie in diesem Beitrag gezeigt – die Wirkung des Waldes untersucht werden. Die dokumentierten Ereignisse weisen einerseits auf die stabilisierende Wirkung des Waldes an steilen Hängen hin, andererseits jedoch auch auf die grosse Bedeutung des Waldzustandes. Allerdings ist je nach Unwetterereignis und betroffener Region mit teilweise divergierenden Ergebnissen zu rechnen. Um die ablaufenden Prozesse und die Waldwirkungen noch besser ergründen zu können, sollte einerseits die Rutschungsdatenbank mit Daten künftiger Ereignisse ergänzt und andererseits untersucht werden, wie der Waldzustand angesprochen werden kann, um die Rutschungswahrscheinlichkeit präziser vorhersagen zu können.

Eingereicht: 8. März 2019, akzeptiert (mit Review): 28. August 2019

Dank

Wir danken Hansueli Bucher, Stefan Kamm und weiteren Personen für die Mitwirkung bei den Felderhebungen sowie Alexandre Badoux für wertvolle Hinweise zum Manuskript. Die Erstellung der

WSL-Rutschungsdatenbank wurde durch das Bundesamt für Umwelt unterstützt. Die statistischen Auswertungen erfolgten im Rahmen eines vom Wald- und Holzforschungsfonds finanzierten Projektes (WHFF 2017.19).

Literatur

- AGN (2004)** Gefahreinstufung Rutschungen i.w.S. Zürich: Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie, Arbeitsbericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie. 17 p.
- ANDRECS P, MARKART G, LANG E, HAGEN K, KOHL B ET AL (2002)** Untersuchung der Rutschungsprozesse im Mai 1999 im Lattersertal (Vorarlberg). In: AndreCs P, Bauer W, Hagen K, Kohl E, Lang E et al, editors (2002) Beiträge zur Wildbachforschung. Wien: Bundesforschungszentrum Wald, Ber 127. pp. 55–87.
- BAFU (2016)** Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Stein Schlag und Hangmuren. Bern: Bundesamt Umwelt. 100 p.
- BATHURST JC, BOVOLO CI, CISNEROS F (2010)** Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecol Eng* 36: 317–327.
- BARIK MG, ADAM JC, BARBER ME, MUHUNTHAN B (2017)** Improved landslide susceptibility prediction for sustainable forest management in an altered climate. *Eng Geol* 230: 104–117.
- BEBI P, SEIDL R, MOTTA R, FUHR M, FIRM F ET AL (2016)** Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *For Ecol Manage* 388: 43–56.
- BEBI P, BAST A, GINZLER C, RICKLI C, SCHÖNGRUNDNER K ET AL (2019)** Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweiz Z Forstwes* 170: 318–325. doi: 10.3188/szf.2019.0318
- DAMM B, KLOSE M (2015)** The landslide database for Germany: Closing the gap at national level. *Geomorphology* 249: 82–93.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 564 p.
- GINZLER C, HOBI ML (2016)** Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweiz Z Forstwes* 167: 128–135. doi: 10.3188/szf.2016.0128
- GRAF F, BEBI P, BRASCHLER U, DE CESARE G, FREI M ET AL (2017)** Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL, Ber 56. 42 p.
- GRAY DH (1995)** Influence of vegetation on the stability of slopes. In: Barker DH, editor. *Vegetation and slopes: stabilisation, protection and ecology*. London: Telford. pp. 2–24.
- GUZZETTI F, CARDINALI M, REICHENBACH P, CIPOLLA F, SEBASTINI C ET AL (2004)** Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy. *Eng Geol* 73: 229–245.
- HILKER N, BADOUX A, HEGG C (2009)** The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Nat Haz Earth Syst Sci* 9: 913–925.
- HUSSON F, LÉ S, PAGÈS J (2017)** Exploratory multivariate analysis by example using R. London: Chapman & Hall, Computer Science and Data Analysis Series. 248 p.
- MARKART G, PERZL F, KOHL B, LUZIAN R, KLEEMAYR K ET AL (2007)** 22nd and 23rd august 2005 – analysis of flooding events and mass movements in selected communities of Vorarlberg. Wien: Bundesforschungszentrum für Wald, BFW-Dokumentation 5/2007. 45 p.
- MOOS C, BEBI P, GRAF F, MATTLI J, RICKLI C, SCHWARZ M (2016)** How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surf Process Landf* 41: 951–960.

- PLANZER T (2018)** Vegetationshöhenmodelle in Gebieten von flachgründigen Rutschungen. Zollikofen: Hochschule Agrar-Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 66 p.
- R CORE TEAM (2018)** R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- RICKLI C (2001)** Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 97 p.
- RICKLI C, ZÜRCHER K, FREY W, LÜSCHER P (2002)** Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweiz Z Forstwes 153: 437–445. doi: 10.3188/szf.2002.0437
- RICKLI C, RAETZO H, MCARDILL B, PRESLER J (2008)** Hanginstabilitäten. In: Bezzola, GR, Hegg C, editors. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern: Bundesamt Umwelt. pp. 97–116.
- RICKLI C, GRAF F (2009)** Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. For Snow Landsc Res 82 (1): 33–44.
- SCHMALTZ EM, STEGER S, GLADE T (2017)** The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. Geomorphology 290: 250–264.
- SCHWARZ M (2019)** Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. Schweiz Z Forstwes 170: 292–302. doi: 10.3188/szf.2019.0292
- SIDLE RC, OCHIAI H (2006)** Landslides: processes, prediction, and land use. Washington DC: Amer Geophysical Union, Water Resources Monograph 18. 312 p.
- WATSON AJ, PHILLIPS CJ, MARDEN M (1999)** Root strength, growth and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. Plant Soil 217: 39–47.
- WSL, BAFU (2018)** Dokumentation von Hangmuren und spontanen Rutschungen. Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 27 p.

La forêt protège-t-elle des glissements de terrain? Eclairages à partir de la banque de données des glissements de terrain du WSL

Pendant les épisodes de forte pluie, des glissements superficiels et des coulées de boue se produisent régulièrement, parfois avec des dégâts importants. Les analyses d'intempéries montrent que le nombre de glissements de terrain par unité de surface est généralement moindre en forêt qu'en dehors de la forêt, ce qui souligne l'influence positive de la forêt, généralement reconnue, sur la stabilité des versants. Cette influence est cependant dépendante de l'état des peuplements forestiers et est difficile à quantifier. Les documentations des événements contribuent à une meilleure compréhension des processus déterminants. Les informations qui en découlent sont importantes non seulement pour l'élaboration de cartes de danger, mais constituent aussi un avantage précieux pour l'évaluation de l'efficacité de l'effet protecteur de la forêt. Pour le présent article, les informations de la banque de données des glissements de terrain de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) ont été traitées pour évaluer l'influence de la forêt sur la stabilité des versants. Actuellement, la banque de données comprend des informations sur 734 glissements. Parmi ceux-ci, 661 ont été pris en compte pour l'évaluation, 356 hors forêt et 305 en forêt. Il apparaît que, sur les versants d'inclinaison inférieure à 38°, les glissements par unité de surface sont plus nombreux hors forêt qu'en forêt. Dans les pentes encore plus raides, il n'est plus possible de détecter une influence stabilisante de la forêt. Les évaluations statistiques indiquent toutefois que les glissements sont généralement plus petits en forêt qu'en dehors de la forêt, et ne se déclenchent que sur des pentes avec des inclinaisons supérieures. En général, les glissements sont de dimension moindre avec l'augmentation de la pente. Les analyses multivariées indiquent des effets forestiers positifs respectivement des glissements de terrain relativement petits dans les peuplements bien développés et étagés. Des effets négatifs sont par contre observés dans les zones temporairement non boisées et les forêts très denses. Au-delà de l'importance de l'état de la forêt pour la stabilité des versants, l'article se penche sur la façon dont ce dernier peut être décrit.

Does the forest provide protection from landslides? Evidence from the WSL Shallow Landslide Database

During strong rainfall events, shallow landslides and debris avalanches (hillslope debris flows, or open-slope debris flows) are triggered and sometimes lead to considerable damage. Analysis of damage-causing events show that there are fewer landslides in forested areas compared to non-forested areas, which indicates the generally positive influence of forest vegetation on slope stability. However, these effects depend on the condition of the forest stand and quantification of the effects is difficult. Event documentation contributes to a better understanding of the relevant processes. The information obtained is not only important for the preparation of hazard maps, but also provides valuable insight for assessing the hazard protection provided by the forest. Data from the landslide database of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) were used to evaluate the influence of the forest on slope stability. Currently, the database contains information on 734 landslides. Of these, 661 were included in the evaluation – 356 landslides in non-forested areas and 305 in forested areas. In areas with slope angles up to 38°, more landslides per unit area are observed in non-forested areas than in forested areas. In areas with steeper slope angles a stabilizing effect of the forest is no longer recognizable. Statistical analyses show that landslides in forested areas are smaller than in non-forested areas and are more frequent on steeper slopes. In general, the landslides become smaller with increasing slope. Multivariate analyses indicate a positive influence of the forest and also somewhat smaller landslides in well-developed forests. Negative effects are evident in non-forested areas and in areas with overly dense forests. In addition to illustrating the importance of the forest condition for slope stability, the paper also discusses how the forest condition can be described.