

Dokumentation des Forschungsprojekts

Quantifizierung der Oberflächenenerosion und des Oberflächenabflusses im Wald

Schlussbericht



Autoren: Dominik May, Massimiliano Schwarz
Version: 02.06. 2025

Impressum

Trägerschaft
Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Bern (BE-AWN)
Amt für Umwelt des Fürstentums Liechtenstein (FL-AU)
Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden (GR-AWN)
Amt für Landwirtschaft und Wald des Kantons Luzern (LU-LAWA)
Amt für Wald und Energie des Kantons Nidwalden (NW-AWE)
Sektion Wald des Kantons Tessin (TI-SW)
Wald- und Holzforschungsfond Schweiz (WHFF-CH)
Verfasser
Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (BFH-HAFL)
Zitiervorschlag
Dominik May, Massimiliano Schwarz. Dokumentation des Forschungsprojekts - Quantifizierung der Oberflächenerosion und des Oberflächenabflusses im Wald - Schlussbericht. Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften . 2024.

Zusammenfassung

Projektübersicht	
Zeitraum	01.01.2022-31.12.2024
Phase	1, 2, 3 und 4
Schwerpunkte	Erosion, Abfluss
Höhepunkte	Messung der Prozesse mit Fokus auf Oberflächenabfluss auf 22 Standorten, Überwachung der Dynamik mit Fokus auf Oberflächenerosion über 3 Jahre, Parameterisierung der Prozesse mit Standortsteckbriefen, Abflusstabelle und Fallstudie
Projektfortschritt	
Projektkoordination	Auswahl von 22 Standorten
Kastenerosimeter	Durchführung auf 2 Standorten
Charakterisierung der Standorte	Durchführung auf 22 Standorten
Regensimulator Profilskala	Durchführung auf 20 Standorten
Regensimulator Böschungsskala	Durchführung auf 2 Standorten
Drohnenbilder	Durchführung auf 1 Standort
Auswertung der Daten	Standortsteckbriefe, Abflusstabelle und Fallstudie
Abschlussbericht und Workshop	2 Zwischenberichte im Winter 2022 und im Winter 2023, 1 Schlussbericht im Winter 2024, Workshop im Frühling 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Durchführung	6
2	Messung der Prozesse	9
2.1	Regensimulator Profilskala	9
2.1.1	Material und Methode	9
2.1.2	Resultate Situation Holzschlag	12
2.1.3	Resultate Situation Wilddruck	15
2.1.4	Resultate Situation Waldbrand	16
2.1.5	Resultate Situation Bodenbedeckung	18
2.1.6	Resultate Situation Bestandeszustand	19
2.2	Regensimulator Böschungsskala	22
2.2.1	Material und Methode	22
2.2.2	Resultate Situation Bestandeszustand	24
3	Überwachung der Dynamik	27
3.1	Kastenerosimeter	27
3.1.1	Material und Methode	27
3.1.2	Resultate Situation Holzschlag	30
3.2	Drohnenbilder	32
3.2.1	Material und Methoden	32
3.2.2	Resultate Situation Holzschlag	32
4	Parametrisierung der Prozesse	34
4.1	Charakterisierung der Standorte	34
4.1.1	Material und Methode	34
4.1.2	Standortsteckbriefe	36
4.2	Auswertung der Daten	36
4.2.1	Material und Methode	36
4.2.2	Abflusstabelle	38
5	Ausblick	42
5.1	Schlussfolgerungen	42
5.2	Weiterführung	43

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Wasserprozesse wie Oberflächenabfluss, Überschwemmung, Murgang und Ufererosion tragen zu einem grossen Anteil an der Schadenssumme von Naturgefahren in der Schweiz bei. Bereits vor über einem Jahrhundert ist die hydrologische Wirkung des Waldes erkannt worden, wonach der Wald tendenziell mehr Wasser und Sedimente zurückhalten und damit zum Schutz vor Wasserprozessen beitragen kann. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde ein strengerer Waldschutz eingeführt und grossflächige Aufforstungen umgesetzt.

Im Unterschied zu gravitativen Naturgefahren wie Steinschlag und Rutschung, kann die Schutzwirkung des Waldes gegen hydraulische Naturgefahren bis heute nicht befriedigend quantifiziert werden. Zum Beispiel kann für einen Steinschlagschutz die durch einen Wald abgebaute Energie ziemlich genau berechnet werden, während dies für das zurückgehaltene Wasser im Hochwasserschutzwald so noch nicht möglich ist. Dadurch ist es mit Schwierigkeiten verbunden, einen Nachweis für die Schutzwirkung zu erbringen und Richtlinien für den Schutzwald zu definieren.

Die fehlende Verfügbarkeit praxistauglicher, quantitativer Methoden zur Berechnung der Schutzwirkung von Wäldern gegen hydraulische Naturgefahren ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Zum einen erschwert die hohe Komplexität der interagierenden Faktoren und Prozesse eine genaue Modellierung. Zum anderen mangelt es an empirischen Grundlagen für eine Klassifizierung als erster Schritt und die Kalibrierung von Modellen als zweiter Schritt. In der Schweiz sind experimentelle Untersuchungen zur Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion im Wald begrenzt und wurden oft nicht systematisch über längere Zeiträume durchgeführt. Dadurch gibt es Lücken im vorhandenen Verständnis wie auch in den verfügbaren Daten, deren Schliessung aufwändig aber für den Umgang mit hydraulischen Naturgefahren im Wald notwendig ist.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel dieses Projektes ist es, neue quantifizierbare Erkenntnisse über die Prozesse des Oberflächenabflusses und der Oberflächenerosion für Schweizerische Waldstandorte zu gewinnen. Mit Daten aus Messungen im Feld sowie der Ausarbeitung einer Parametrisierung zu diesen Prozessen soll eine Grundlage für weitere Forschung der Forsthydrologie und für die praktischen Anwendung geschaffen werden. Dafür werden ausgehend von diesem Hauptziel 3 Teilziele (TZ) definiert, denen die entsprechenden Arbeitspakete (AP) zugeordnet sind.

Das erste Teilziel ist die Messung der Prozesse (TZ 1) des Oberflächenabflusses und der Oberflächenerosion auf ausgewählten Waldstandorten. Dafür werden Beregnungsexperimente mit einem Regensimulator auf Profilskala (AP 4) und mit einem Regensimulator auf Böschungsskala (AP 5) durchgeführt. Damit werden grundlegende Daten zu den Prozessen mit Punktmessungen auf zwei verschiedenen räumlichen Skalen erhoben.

Das zweite Teilziel ist die Überwachung der Dynamik (TZ 2) der Oberflächenerosion und des Oberflächenabfluss auf einem Holzschlag und der entsprechenden Kontrolle in Bedano. Dafür werden Erhebungen mit Kastenerosimeter (AP 2) und Drohnenbilder (AP 6) über insgesamt 3 Jahre durchgeführt. Damit werden zusätzliche Daten zu den Prozessen als Zeitreihe und über eine unterschiedene zeitliche Skala gegenüber den Beregungsexperimenten erhoben.

Das dritte Teilziel ist die Parametrisierung der Prozesse (TZ 3) des Oberflächenabflusses und der Oberflächenerosion. Dafür werden mit quantitativen Ansätzen eine Charakterisierung der Standorte (AP 3) und eine Auswertung der Daten (AP 7) durchgeführt. Damit sollen Verknüpfungen zwischen messbaren Standorteigenschaften und kalibrierten Modellen für die Prozesse geschaffen werden.

Diese Erkenntnisse könnten mittelfristig in Richtlinien für die Schutzwaldpflege (NaiS) und die Bewertung von biologischen Schutzmassnahmen (PROTECT-BIO, PROTECT-Praxis) ausgearbeitet werden. Weiterhin sollen damit langfristig Modelle für diese Prozesse entwickelt werden, welche die Waldwirkung mit berücksichtigen und im Waldmanagement sowie der Gefahrenbeurteilung angewendet werden können. Solche Modelle sind ein wichtiges Werkzeug für die zielführende Planung im Schutzwald, die Erstellung von Gefahrenkarten und die risikobasierte Beurteilung von Schutzmassnahmen.

1.3 Durchführung

Die Teilbereiche zur Messung der Prozesse und zur Überwachung der Dynamik beinhalteten neben wenig Büroarbeit zur Vorbereitung und Nachbereitung viel Feldarbeit. Für das Forschungsprojekt wurde insgesamt in 9 Gebieten auf 22 Standorten Feldarbeit zur Erhebung von Daten zum Oberflächenabfluss und zur Oberflächenerosion über die Jahre 2021, 2022, 2023 und 2024 durchgeführt. Diese Gebiete befinden sich in den Kantonen Bern, Graubünden, Luzern, Nidwalden und im Fürstentum Liechtenstein in den nördlichen Randalpen sowie im Kanton Tessin in den südlichen Randalpen und Zwischenalpen (Figur 1). Dabei wurden mit gepaarten Standorten verschiedene Situationen untersucht, welche Holzschlag, Wilddruck und Waldbrand als Störungen sowie Bodenbedeckung und Bestandeszustand als Variation der Vegetation umfassen (Tabelle 1). Das wesentliche Produkt aus diesen Teilbereichen ist das Tabellenwerk mit allen in diesem Forschungsprojekt erhobenen Daten.

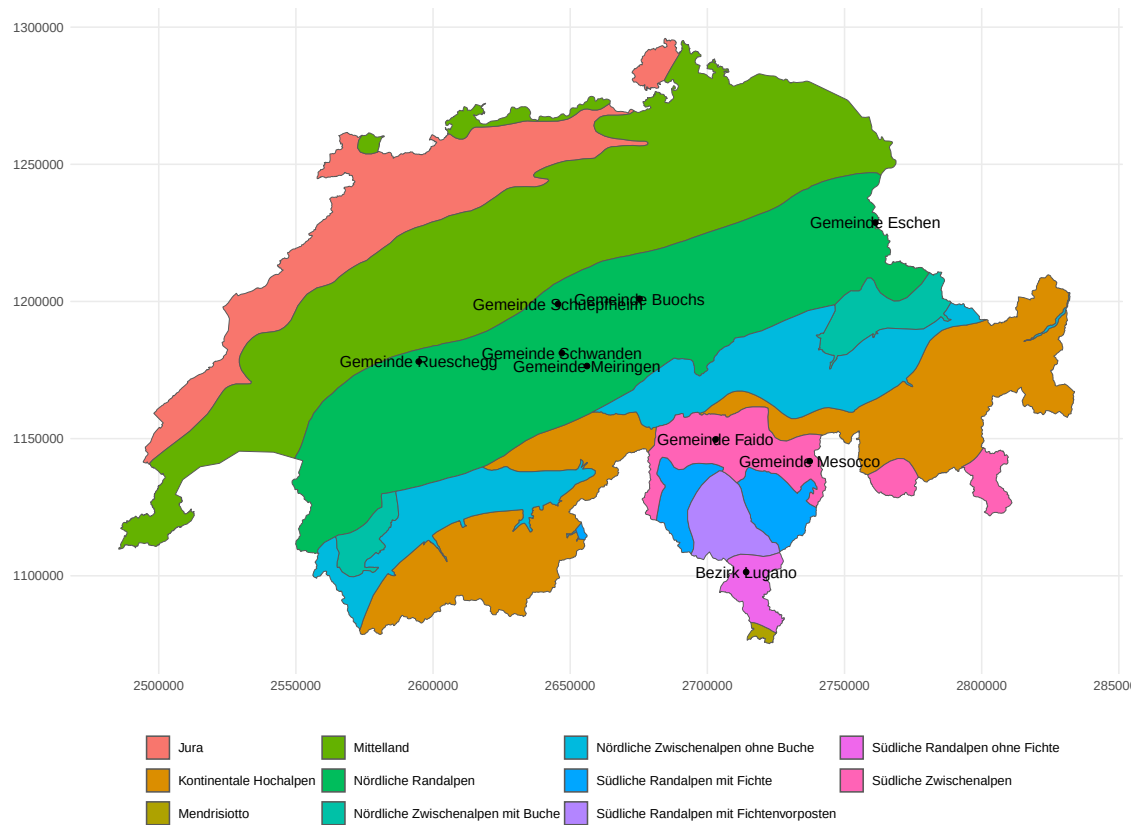


Abbildung 1: Karten mit allen untersuchten Standorten im Rahmen des Forschungsprojekts mit den Waldstandortsregionen als Hintergrund.

Tabelle 1: Übersicht zu allen untersuchten Standorten im Rahmen des Forschungsprojekts und den durchgeführten Arbeiten.

Gebiet	Partner	Waldstandorts region	Höhenstufe	Situation	Arbeitspakete
Bezirk Lugano	Kanton Tessin	Südliche Randalpen ohne Fichte	Collin mit Buche	Holzschlag, Waldbrand	Kasten-erosimeter, Regensimulator Profilskala, Drohnenbilder
Gemeinde Meiringen	Kanton Bern	Nördliche Randalpen	Submontan	Waldbrand	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Mesocco	Kanton Graubünden	Südliche Zwischenalpen	Hochmontan im Tannen-Nebenareal	Wilddruck	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Faido	Kanton Tessin	Südliche Zwischenalpen	Collin	Wilddruck	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Eschen	Fürstentum Liechtenstein	Nördliche Randalpen	Hochmontan im Tannen-Hauptareal	Holzschlag, Wilddruck	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Schüpfheim	Kanton Luzern	Nördliche Randalpen	Holzschlag, Bodenbedeckung	Obermontan	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Rüschegg	Kanton Bern	Nördliche Randalpen	Obermontan	Bodenbedeckung Bestandeszustand	Regensimulator Profilskala, Regensimulator Böschungsskala
Gemeinde Buochs	Kanton Nidwalden	Nördliche Randalpen	Obermontan	Bestandeszustand	Regensimulator Profilskala
Gemeinde Schwanden	Kanton Bern	Nördliche Randalpen	Subalpin	Bestandeszustand	Regensimulator Profilskala

Der Teilbereich zur Parametrisierung der Daten beinhaltet ausschliesslich Büroarbeit und wurde vor allem im Jahr 2024 durchgeführt. Die wesentlichen Produkte aus diesem Teilbereich sind die Standortsteckbriefe Abfluss (Beilage 5) und die Abflusstabelle Wald (Beilage 1) aus der Messung der Prozesse auf allen Standorten sowie die Fallstudie Bedano (Beilage 3) zur Überwachung der Dynamik auf den

Standorten in Bedano. Zusätzlich gibt es im Zusammenhang mit diesem Forschungsprojekt ein Anwendungsprojekt und einen Artikel über den Einfluss von Wilddruck auf den Oberflächenabfluss und die damit verbundenen Wasserprozesse.

2 Messung der Prozesse

2.1 Regensimulator Profilskala

2.1.1 Material und Methode

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Beregnungsexperimente auf Profilskala auf insgesamt 20 Standorten mit insgesamt 86 Profilen in den Jahren 2021, 2022 und 2023 durchgeführt. Diese Beregnungsexperimente sind klassifiziert nach dem Gebiet, dem Standort und der Situation (Tabelle 2). Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Grunddisposition bezüglich Geologie und Boden in den Gebieten ähnlich und damit vergleichbar ist. Die verschiedenen Standorte unterscheiden sich dann in der variablen Disposition bezüglich der Vegetation, wodurch sich unterschiedliche Situationen definieren lassen.

Tabelle 2: Übersicht zu den Feldarbeiten mit dem Regensimulator auf Profilskala

Gebiet	Standort	Situation
Bezirk Lugano	Brandfläche	Waldbrand
Bezirk Lugano	Bestandfläche	Holzschlag, Waldbrand
Bezirk Lugano	Schlagfläche	Holzschlag
Gemeinde Meiringen	Brandfläche	Waldbrand
Gemeinde Meiringen	Bestandfläche	Waldbrand
Gemeinde Mesocco	Bestandfläche	Wilddruck
Gemeinde Mesocco	Zaunfläche	Wilddruck
Gemeinde Faido	Schlagfläche	Wilddruck
Gemeinde Faido	Zaunfläche	Wilddruck
Gemeinde Eschen	Zaunfläche	Wilddruck
Gemeinde Eschen	Bestandfläche	Holzschlag, Wilddruck
Gemeinde Eschen	Schlagfläche	Holzschlag
Gemeinde Schüpfheim	Bestandfläche	Bodenbedeckung, Holzschlag
Gemeinde Schüpfheim	Schlagfläche	Bodenbedeckung, Holzschlag
Gemeinde Rüschegg	Kronenfläche	Bestandeszustand, Bodenbedeckung
Gemeinde Rüschegg	Lückenfläche	Bestandeszustand, Bodenbedeckung
Gemeinde Buochs	Jungwuchsfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Buochs	Dickungsfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Schwanden	Aufforstungsfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Schwanden	Graslandfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Schwanden	Mischwaldfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Schwanden	Nadelwaldfläche	Bestandeszustand

Mit dem Regensimulator auf Profilskala kann der Waldboden auf einer Fläche von 1 m² kontrolliert beregnet und dabei der Abfluss sowie die Feuchtigkeit gemessen werden. Der verwendete Regensimulator wurde von der Universität Bern entwickelt und bereits in verschiedenen Studien verwendet (Figur 2). Die Regentropfen werden durch Kapillare auf einer bewegten Platte erzeugt, welche dadurch eine

Fläche mit einer Länge und einer Breite von 1 m künstlich beregnet. Hangabwärts dieser Fläche ist ein Bodenprofil mit einer Breite von 1 m ausgehoben, in dem die Abflusssammler und die Feuchtigkeitssensoren in verschiedenen Tiefen installiert sind. Mit diesem System können wesentliche Komponenten der Wasserbilanz und insbesondere der Abflussbildung auf der Profilskala erfasst werden (Tabelle 3).



Abbildung 2: Beispiel für den Regensimulator auf Profilskala im Einsatz auf der Schlagfläche in der Gemeinde Eschen.

Tabelle 3: Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit dem Regensimulator auf Profilskala

Messgrösse	Einheit	Beschreibung
Regenvolumen	dm ³	Volumen des Wassers für die Beregnungsexperimente gemessen mit dem Durchflussmesser alle 5 Minuten.
Abflussvolumen	dm ³	Volumen des Wassers aus den Beregnungsexperimenten gemessen mit 2 Abflusssammler für Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss alle 5 Minuten.
Wassergehalt	dm ³ *m ⁻³	Anteil des Wassers am Volumen des Bodens gemessen mit 6 Feuchtigkeitssensoren in 3 verschiedenen Tiefen alle 5 Minuten.

Der Bezug für die Beregnungsexperimente auf Profilskala sind die Standorte, welche durch ähnliche Eigenschaften bezüglich der Vegetation definiert sind. Auf jedem Standort werden zwischen 3 und 5 Profilen ausgehoben, damit Variabilitäten in den Bodeneigenschaften berücksichtigt werden können. Die 2 Abflusssammler werden immer in einer Tiefe von 5 cm und abhängig von charakteristischen Horizontgrenzen in Tiefen von 20 cm, 35 cm oder 50 cm installiert. Die 6 Feuchtigkeitssensoren werden jeweils paarweise in Tiefen von 15 cm, 30 cm und 45 cm installiert. Auf jedem Profil werden zwischen 2 und 4 Versuche durchgeführt, damit die Auswirkungen der Regenrate und der Vorfeuchtigkeit berücksichtigt werden können. Über die verschiedenen Versuche wird die Regenrate variiert von 60 mm bis 140 mm über jeweils 1 hr, was kurzen aber starken Regenereignissen entspricht mit Wiederkehrzeiten zwischen 100 yr und 1000 yr. Zwischen den Versuchen wird jeweils eine Pause von 1 hr eingelegt, damit die Makroporen vor dem nächsten Versuch zumindest näherungsweise entwässert werden.

2.1.2 Resultate Situation Holzschlag

Die Situation mit Holzschlag ist dadurch definiert, dass jeweils auf einer Fläche in der Grössenordnung von mehreren Aren alle Bäume vor einigen Jahren entnommen wurden. Als Kontrolle zur dieser Schlagfläche gibt es jeweils eine benachbarte Bestandesfläche, auf der keine Bäume entnommen wurden und von der angenommen werden kann, dass der Bestand ähnlich wie vor dem Holzschlag auf der Schlagfläche ist. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation mit Holzschlag in 3 Gebieten (Bezirk Lugano im Kanton Tessin, Gemeinde Eschen im Fürstentum Liechtenstein und Gemeinde Schüpfheim im Kanton

Luzern) auf 6 Standorten untersucht (Figuren 3 und 4).

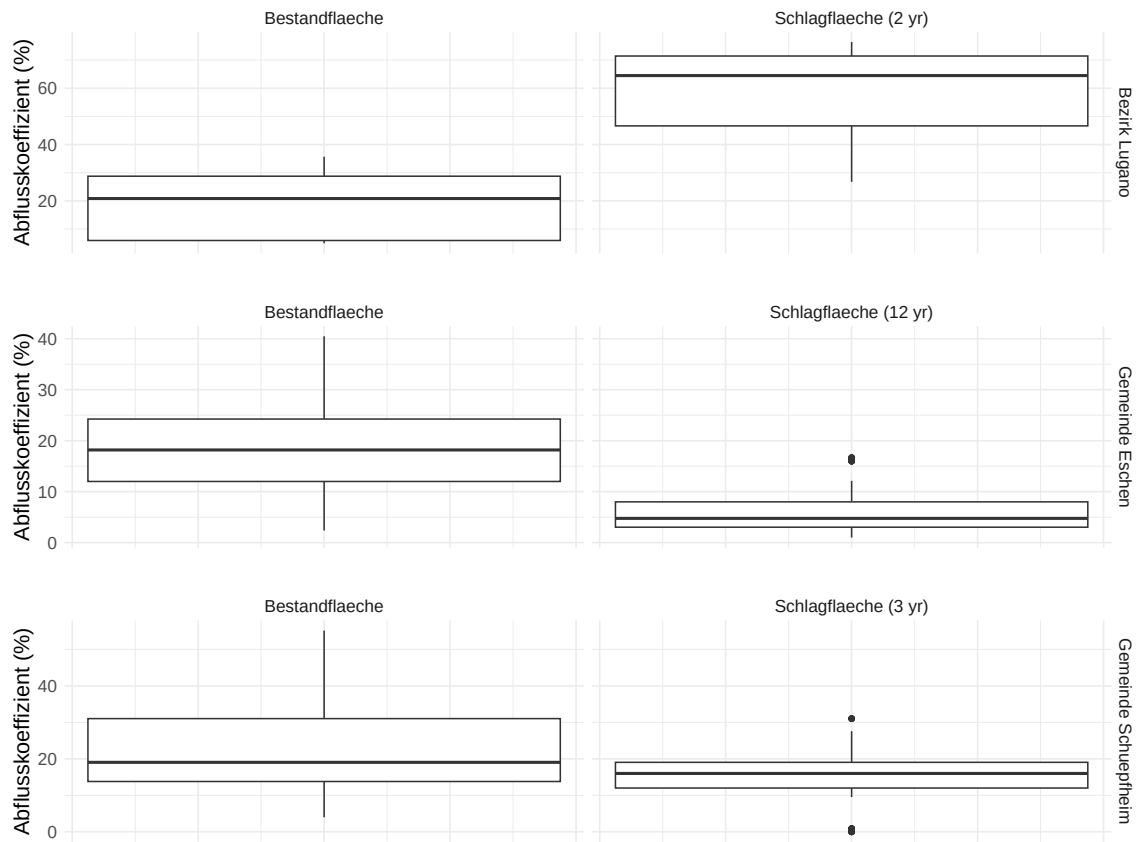


Abbildung 3: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Holzschlag.

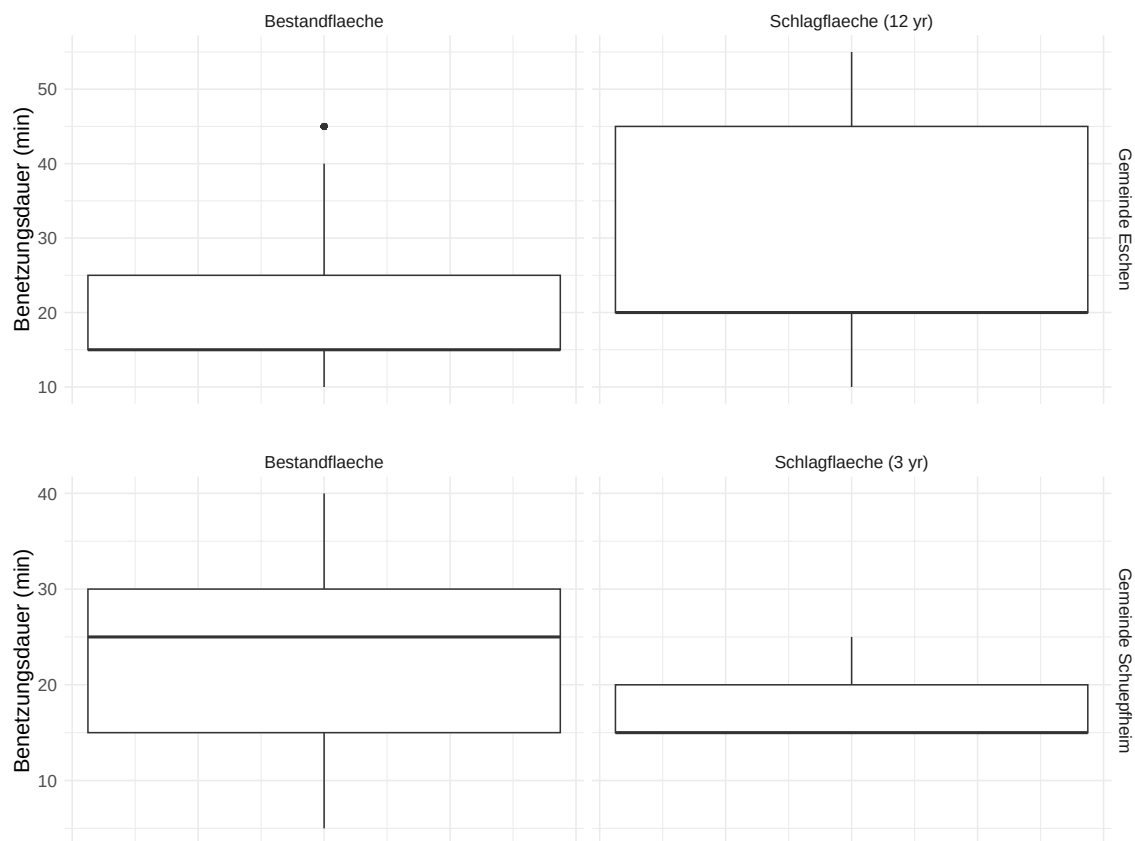


Abbildung 4: Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Holzschlag.

Auf den Standorten im Bezirk Lugano zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Abflusskoeffiziente um 40 % auf der Schlagfläche, während auf den Standorten in der Gemeinde Eschen eine signifikante Verringerung um 12 % und in der Gemeinde Schüpfheim um 7 % festgestellt wird. Diese gehen einher mit einer signifikanten Erhöhung der Benetzungsdauer um 6 min auf den Standorten in der Gemeinde Eschen und einer signifikanten Verringerung um 6 min auf den Standorten in der Gemeinde Schüpfheim. Auf den beiden Standorten in der Gemeinde Eschen kann dies durch die unterschiedlichen Bodentypen und Bodenbedeckungen begründet werden mit einer vernässte Parabraunerde fast ohne Bodenvegetation auf der Bestandesfläche und einer drainierten Braunerde mit flächiger Bodenvegetation auf der Schlagfläche. Auf den beiden Standorten in der Gemeinde Schüpfheim kann dies durch die unterschiedliche Bodenbedeckung begründet werden mit mehr Moos auf der Bestandesfläche und mehr Heidelbeere auf der Schlagfläche. Die Details zum Oberflächenabfluss und auch zur Oberflächenerosion auf diesen beiden Standorten sind in der Fallstudie Bedano dokumentiert (Beilage 3).

2.1.3 Resultate Situation Wilddruck

Die Situation mit Wilddruck ist dadurch definiert, dass jeweils eine Fläche in der Grössenordnung von einigen wenigen Aren vor einigen Jahren eingezäunt wurde. Als Kontrolle zur dieser Zaunfläche gibt es jeweils eine benachbarte Bestandesfläche oder Schlagfläche, auf der ein hoher Wilddruck vorherrscht aber die sonst ähnliche Bedingungen aufweisen wie die Zaunfläche. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation mit Wilddruck in 3 Gebieten (Gemeinde Mesocco im Kanton Graubünden, Gemeinde Faido im Kanton Tessin und Gemeinde Eschen im Fürstentum Liechtenstein) auf 6 Standorten untersucht (Figuren 5 und 6).

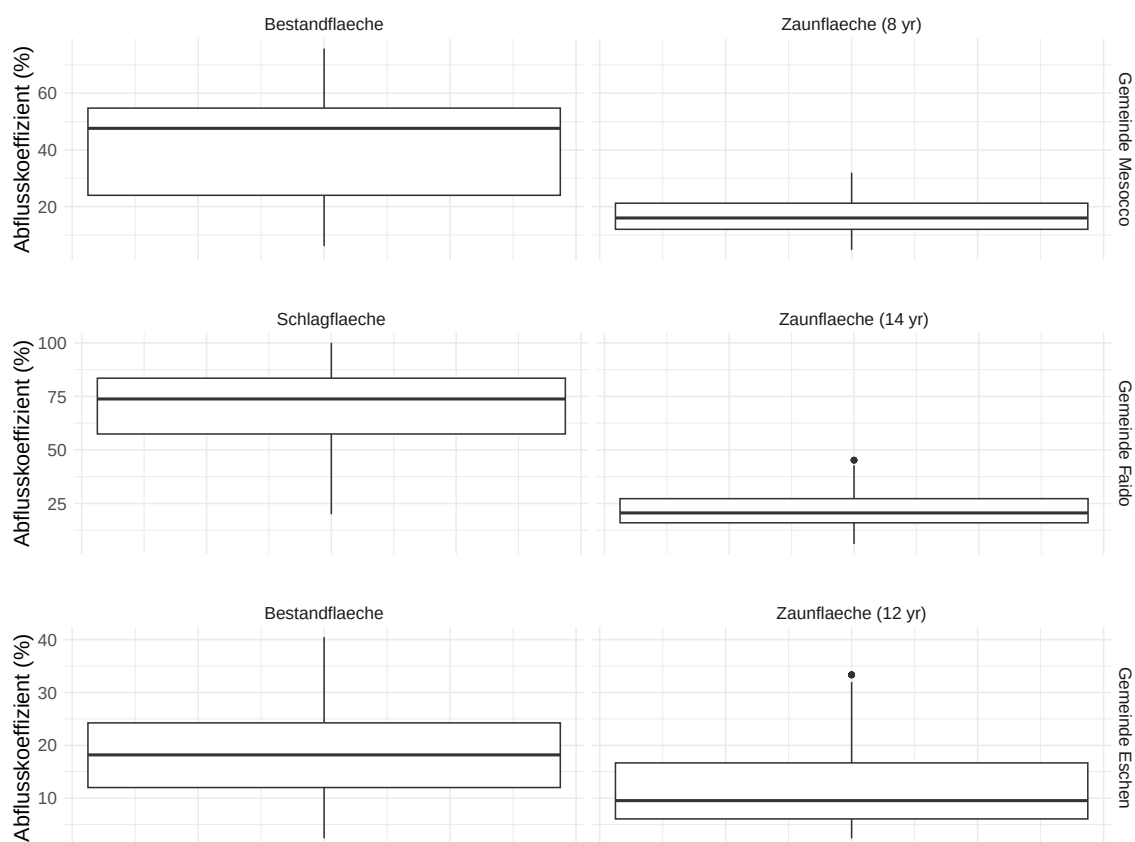


Abbildung 5: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Wilddruck.

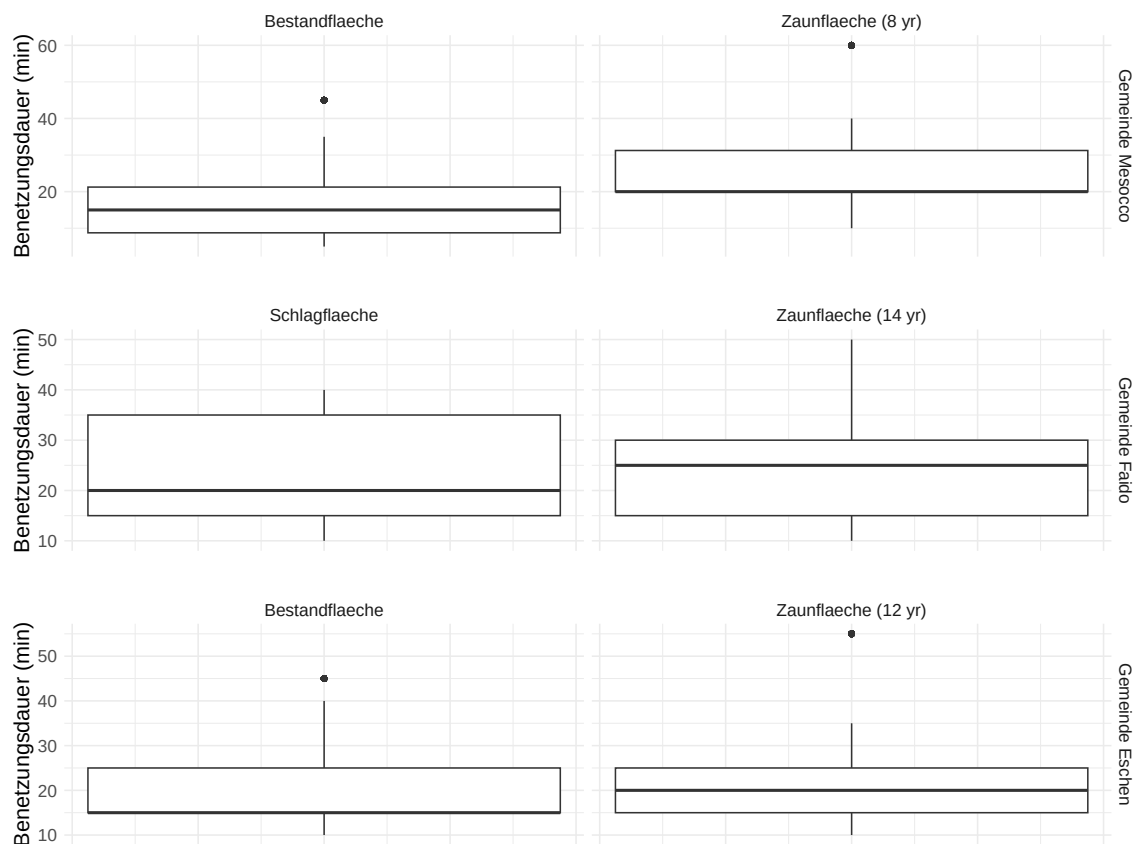


Abbildung 6: Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Wilddruck.

Auf allen untersuchten Standorten zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Abflusskoeffizienten aufgrund des Wilddrucks um 25 % in der Gemeinde Mesocco, um 48 % in der Gemeinde Faido und um 6 % in der Gemeinde Eschen. Dies geht einher mit einer signifikanten Verringerung der Benetzungsdauer um 7 min in der Gemeinde Mesocco, um 4 min in der Gemeinde Faido und um 1 min in der Gemeinde Eschen. Dabei hat der Wilddruck sowohl einen Einfluss auf den Bestandeszustand bezüglich der Zusammensetzung sowie auf die Bodenbedeckung. Die Details zum Einfluss von Wilddruck auf den Abfluss auf diesen Standorten sind in einem Artikel dokumentiert (Beilage 2).

2.1.4 Resultate Situation Waldbrand

Die Situation mit Waldbrand ist dadurch definiert, dass jeweils eine Fläche in der Grössenordnung von einigen Hektaren im selben Jahr gebrannt haben. Als Kontrolle zur dieser Brandfläche gibt es jeweils eine

benachbarte Bestandesfläche, welche nicht vom Brand betroffen war aber die sonst ähnliche Bedingungen aufweisen wie die Brandfläche. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation mit Waldbrand in 2 Gebieten (Bezirk Lugano im Kanton Tessin und Gemeinde Meiringen im Kanton Bern) auf 4 Standorten untersucht (Figur 7).

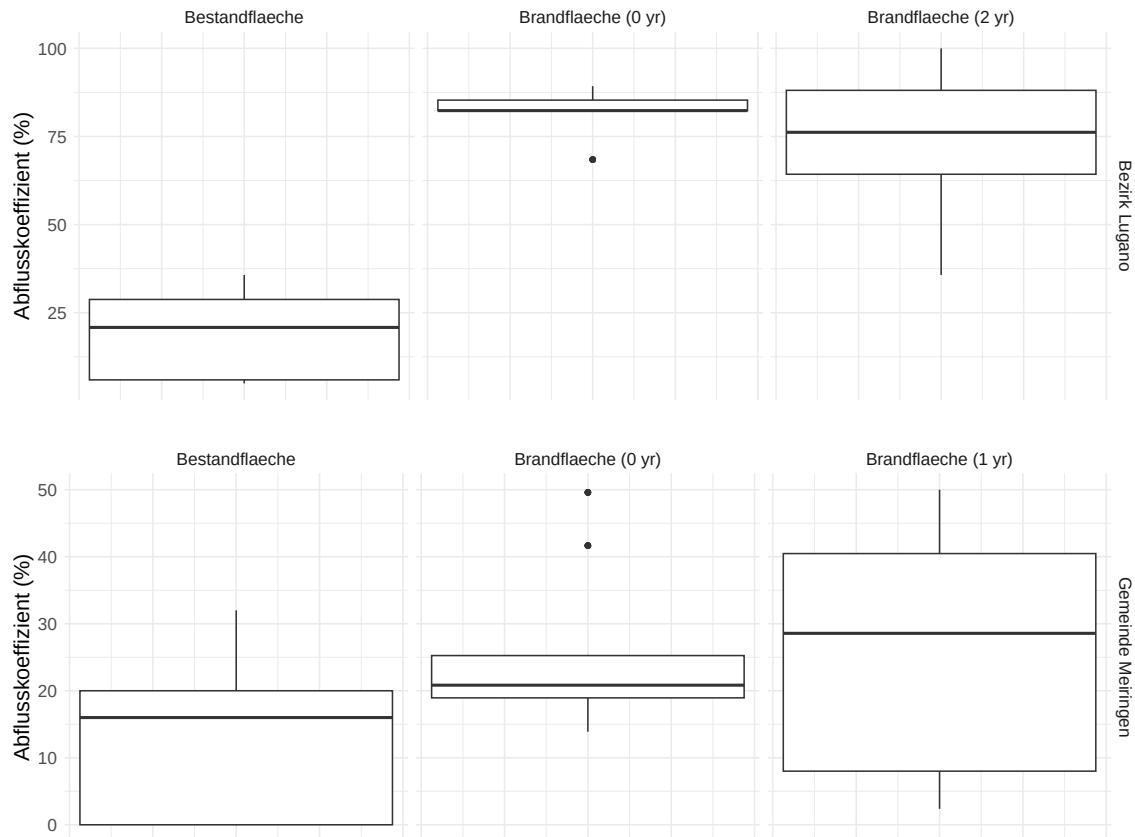


Abbildung 7: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Waldbrand.

Auf allen untersuchten Standorten zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Abflusskoeffizienten. Im Bezirk Lugano beträgt diese Erhöhung 62 % nach 0 yr und 55 % nach 2 yr. In der Gemeinde Meiringen ist diese Erhöhung weniger ausgeprägt mit 14 % nach 0 yr und 13 % nach 1 yr. Dabei ist davon auszugehen, dass sich diese Situation nach einigen Jahren wieder normalisiert kann abhängig von der Entwicklung der Vegetation.

2.1.5 Resultate Situation Bodenbedeckung

Die Situation der Bodenbedeckung ist dadurch definiert, dass jeweils eine Fläche in der Grössenordnung von einigen wenigen Quadratmeter mit unterschiedlicher Bodenvegetation bedeckt ist. Für diese Situation wird keine Kontrolle definiert, sondern eine Variation mit einer Moosfläche und einer Heidelbeerenfläche. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation der Bodenbedeckung in 2 Gebieten (Gemeinde Schüpfheim im Kanton Luzern und Gemeinde Rüschegg im Kanton Bern) auf 4 Standorten untersucht (Figuren 8 und 9).

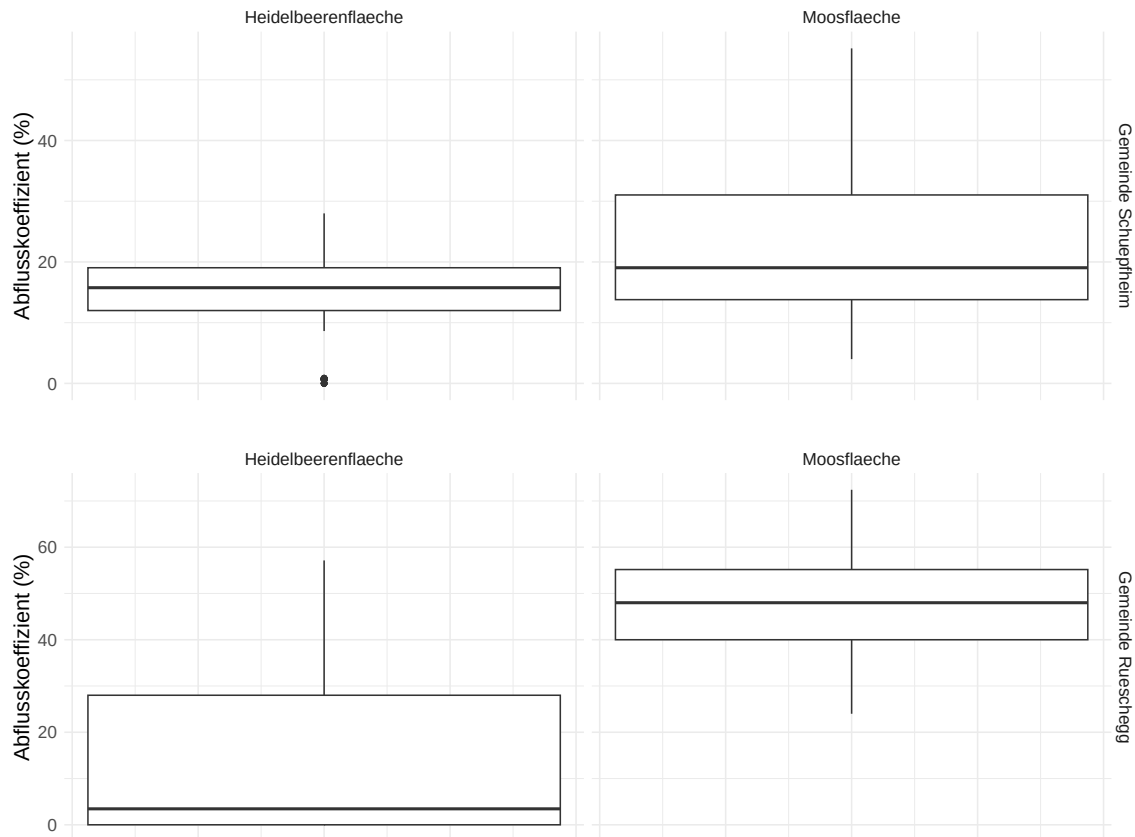


Abbildung 8: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden in der Bodenbedeckung.

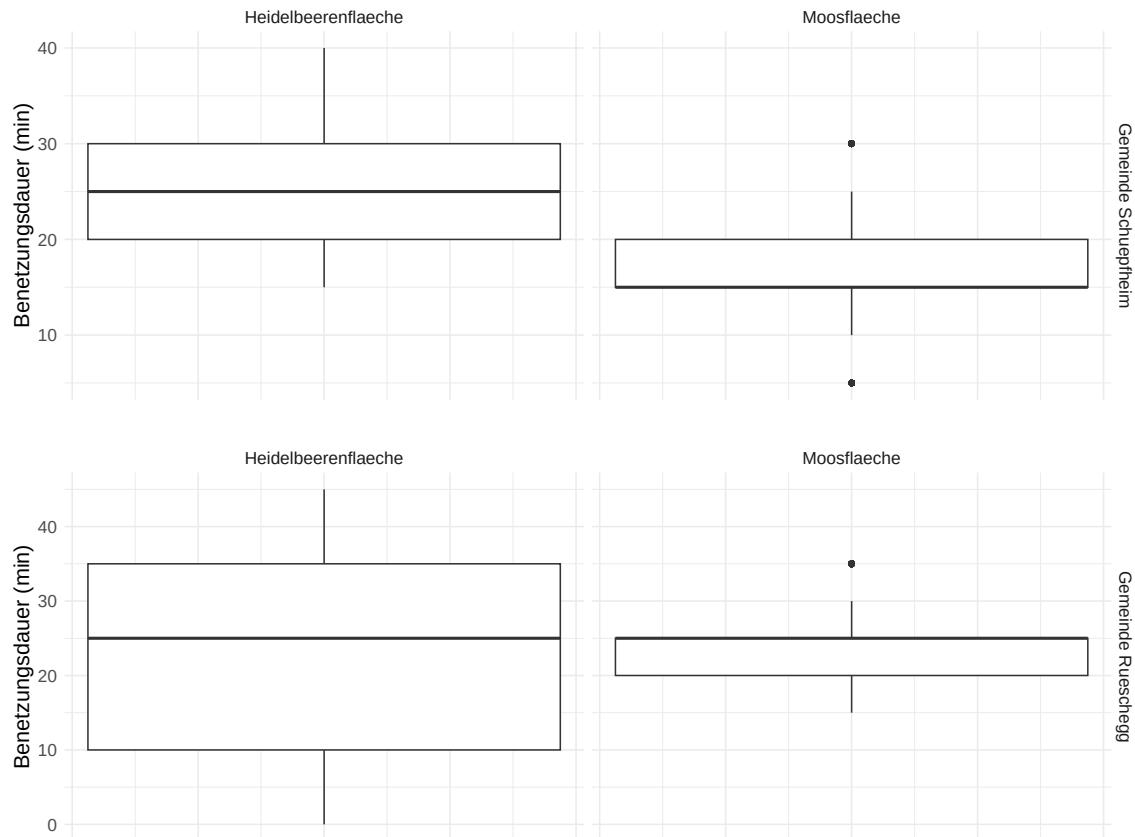


Abbildung 9: Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden in der Bodenbedeckung.

Auf allen untersuchten Standorten zeigt sich eine signifikante Verringerung der Abflusskoeffizienten aufgrund der Bodenbedeckung mit Heidelbeere gegenüber Moos um 7 % in der Gemeinde Schüpfheim, um 34 % in der Gemeinde Rüschegg. Dies geht einher mit einer signifikanten Verringerung der Benetzungsdauer um 8 min in der Gemeinde Schüpfheim, während die Verringerung in der Gemeinde Rüschegg nicht signifikant ist und näherungsweise 0 min beträgt.

2.1.6 Resultate Situation Bestandeszustand

Die Situation des Bestandeszustandes ist dadurch definiert, dass jeweils eine Fläche in der Grössenordnung von einigen wenigen Aren mit einem unterschiedlichen Waldbestand bestockt ist. Für diese Situation wird keine Kontrolle definiert, sondern mehrere Variationen mit Kronenfläche und Lückenfläche (Position im Bestand), Jungwuchsfläche und Dickenfläche (Alter des Bestandes), Aufforstungsfläche und Wie-

senfläche sowie Mischwaldfläche und Nadelwaldfläche (Zusammensetzung des Bestandes). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation der Bodenbedeckung in 3 Gebieten (Gemeinde Rüschegg im Kanton Bern, Gemeinde Buochs im Kanton Nidwalden und Gemeinde Schwanden im Kanton Bern) auf 8 Standorten untersucht (Figuren 10 und 11).

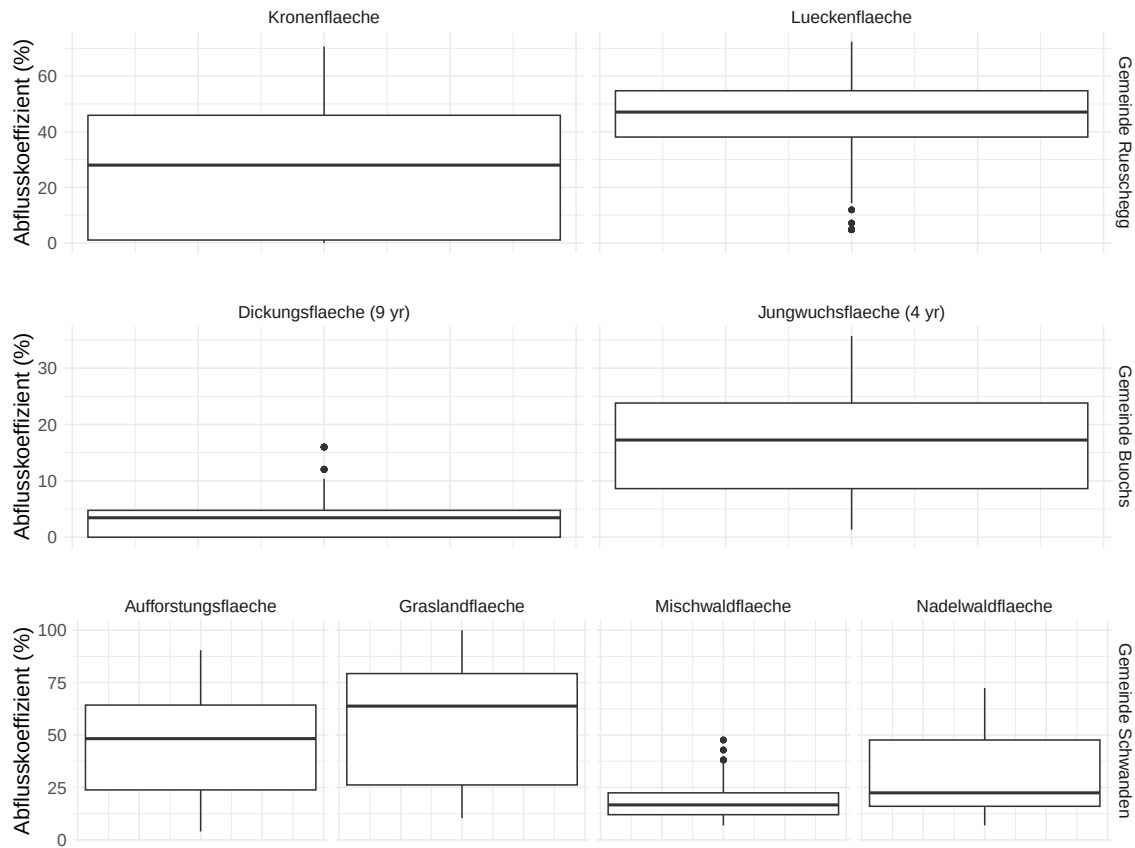


Abbildung 10: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.

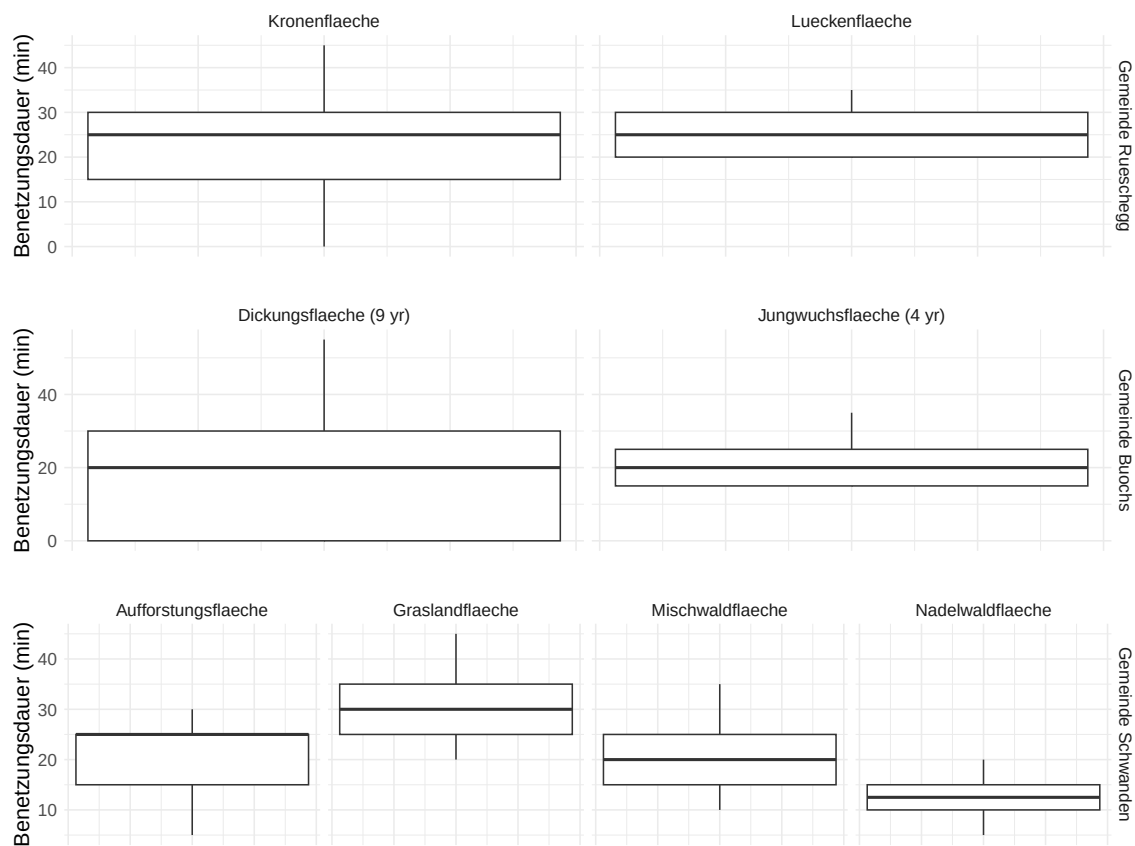


Abbildung 11: Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.

In allen untersuchten Gebieten zeigen sich signifikante Unterschiede im Abflusskoeffizienten und in der Benetzungsdauer aufgrund des Bestandeszustandes. Auf der Kronenfläche sind der Abflusskoeffizient um 19 % und die Benetzungsdauer um 3 min verringert gegenüber der Lückenfläche. Auf der Dickungsfläche sind der Abflusskoeffizient um 13 % und die Benetzungsdauer um 1 min verringert gegenüber der Jungwuchsfläche. Auf der Aufforstungsfläche sind der Abflusskoeffizient um 11 % und die Benetzungsdauer um 9 min verringert gegenüber der Graslandfläche. Auf der Mischwaldfläche sind der Abflusskoeffizient um 12 % verringert und die Benetzungsdauer um 8 min erhöht gegenüber der Nadelwaldfläche. Bis auf die Variation der Hauptbaumart des Bestandes in der Gemeinde Schwanden mit einer feuchten Parabraunerde auf der Mischwaldfläche und einer trockenen Braunerde auf der Nadelwaldfläche sind die Bodentypen in den Gebieten vergleichbar und damit die Unterschiede auf den Bestandeszustand zurückzuführen.

2.2 Regensimulator Böschungsskala

2.2.1 Material und Methode

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Beregnungsexperimente auf Böschungsskala auf 2 Standorten in den Jahren 2023 und 2024 durchgeführt. Diese Beregnungsexperimente sind klassifiziert nach dem Gebiet, dem Standort und der Situation (Tabelle 4). Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Grunddisposition bezüglich Geologie und Boden im Gebiet ähnlich und damit vergleichbar ist. Die beiden Standorte unterscheiden sich dann in der variablen Disposition bezüglich der Vegetation, wodurch sich zwei unterschiedliche Situationen für die Beregnungsexperimente definieren lassen.

Tabelle 4: Übersicht zu den Feldarbeiten mit dem Regensimulator auf Böschungsskala

Gebiet	Standort	Situation
Gemeinde Rüschegg	Fichtenfläche	Bestandeszustand
Gemeinde Rüschegg	Tannenfläche	Bestandeszustand

Mit dem Regensimulator auf Böschungsskala kann der Waldboden auf einer Fläche 50 m² von kontrolliert beregnet und dabei der Abfluss sowie die Feuchtigkeit gemessen werden. Der verwendete Regensimulator wurde von der österreichischen Bundesforschungsanstalt für Wald entwickelt und bereits in verschiedenen Studien verwendet (Figur 12). Die Regentropfen werden durch Düsen auf einem Rahmen erzeugt, welcher dadurch eine Fläche mit einer Länge von 10 m und einer Breite von 5 m künstlich beregnet. Hangabwärts dieser Fläche ist ein Bodenprofil mit einer Breite von 5 m ausgehoben, in dem die Abflusssammler und die Feuchtigkeitssensoren in verschiedenen Tiefen installiert sind. Mit diesem System können dieselben Komponenten der Wasserbilanz und insbesondere der Abflussbildung wie auf der Profilskala erfasst und auf die Böschungsskala aufskaliert werden (Tabelle 5).



Abbildung 12: Beispiel für den Regensimulator auf Böschungsskala im Einsatz auf der Tannenfläche in der Gemeinde Rüschegg.

Tabelle 5: Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit dem Regensimulator auf Böschungsskala

Messgrösse	Einheit	Beschreibung
Regenvolumen	dm ³	Volumen des Wassers für die Beregnungsexperimente gemessen mit dem Durchflussmesser alle 5 Minuten.
Abflussvolumen	dm ³	Volumen des Wassers aus den Beregnungsexperimenten gemessen mit 2 Abflusssammler für Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss alle 5 Minuten.
Wassergehalt	dm ³ *m ⁻³	Anteil des Wassers am Volumen des Bodens gemessen mit 6 Feuchtigkeitssensoren in 3 verschiedenen Tiefen alle 5 Minuten.

Der Bezug für die Beregnungsexperimente auf Böschungsskala sind die Standorte, welche räumlich durch ähnliche Eigenschaften bezüglich der Vegetation definiert sind. Auf jedem Standort wird 1 Graben ausgehoben, so dass hangaufwärts eine möglichst gleichförmige Fläche abgegrenzt werden kann. Die 2 Abflusssammler werden immer in einer Tiefe von 5 cm und abhängig von charakteristischen Horizontgrenzen in Tiefen von 20 cm, 35 cm oder 50 cm installiert. Die 6 Feuchtigkeitssensoren werden jeweils paarweise in Tiefen von 15 cm, 30 cm und 45 cm installiert. Auf jedem Standort werden zwischen 4 und 8 Versuche durchgeführt, damit die Auswirkungen der Regenrate und der Vorseuchtheit abgebildet werden können. Über die verschiedenen Versuche wird die Regenrate variiert von 60 mm bis 140 mm über jeweils 1 hr, was kurzen aber starken Regenereignissen entspricht mit Wiederkehrzeiten zwischen 100 yr und 1000 yr. Zwischen den Versuchen wird jeweils eine Pause von 1 hr eingelegt, damit die Makroporen vor dem nächsten Versuch zumindest näherungsweise entwässert werden.

2.2.2 Resultate Situation Bestandeszustand

Die Situation des Bestandeszustandes ist dadurch definiert, dass jeweils eine Fläche in der Grössenordnung von einigen wenigen Aren mit einem unterschiedlichen Waldbestand bestockt ist. Für diese Situation wird keine Kontrolle definiert, sondern eine Variation mit Fichtenfläche und Tannenfläche (Hauptbaumart des Bestandes). Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation der Bodenbedeckung in 1 Gebiet auf 2 Standorten untersucht (Figuren 13 und 14).

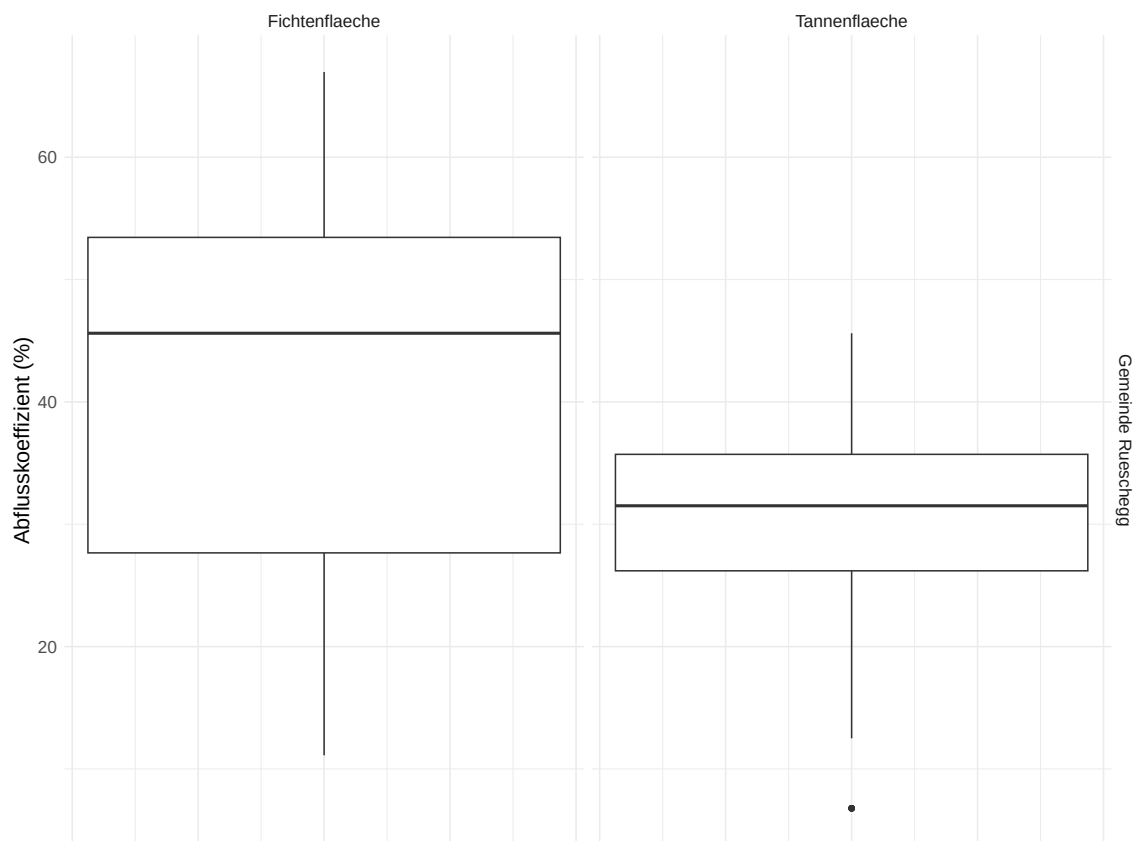


Abbildung 13: Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.

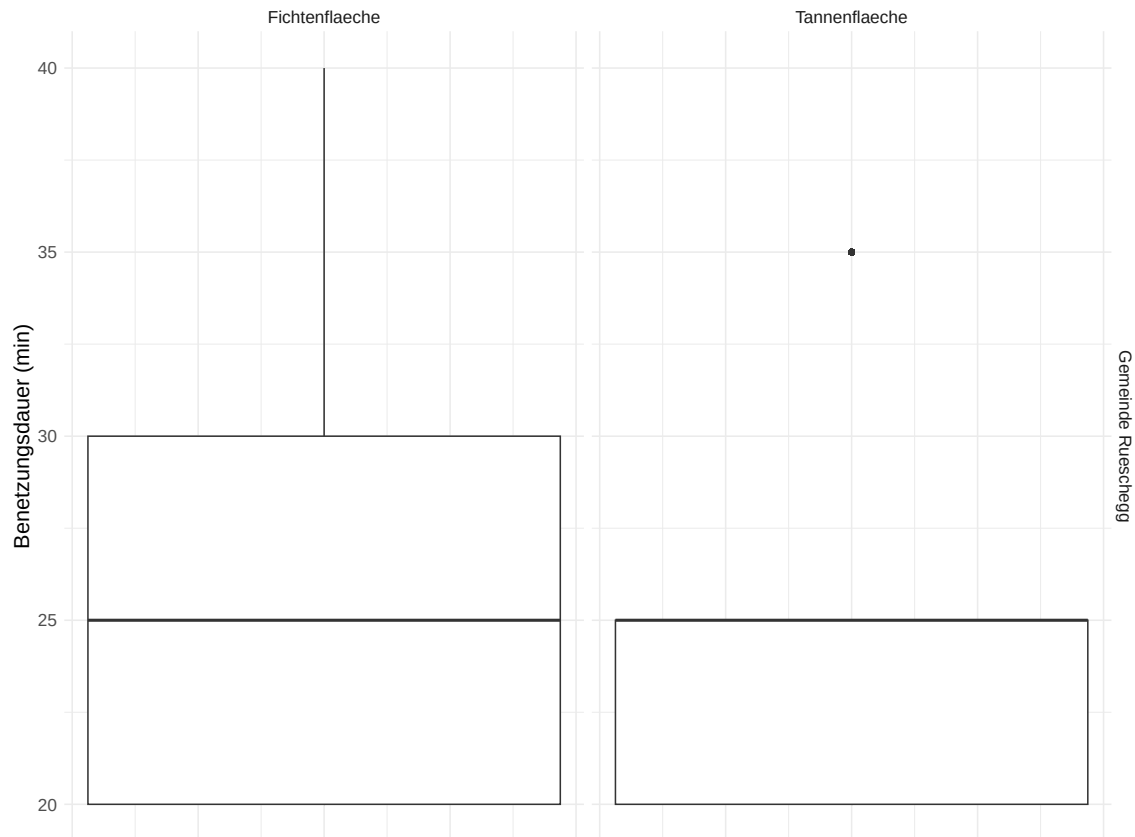


Abbildung 14: Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.

Im untersuchten Gebiet zeigen sich signifikante Unterschiede der Abflusskoeffizienten aber keine signifikanten Unterschiede der Benetzungsdauer aufgrund des Bestandeszustandes. Auf der Fichtenfläche sind die Abflusskoeffizienten um 10 % erhöht und die Benetzungsdauer um 1 min verringert gegenüber der Tannenfläche. Die Beregnungsexperimente auf Profilskala sind vergleichbar mit den Beregnungsexperimente auf Böschungsskala auf der Fichtenfläche, wobei diese alle Variationen mit Kronenfläche, Lückenfläche, Heidelbeerenfläche und Moosfläche beinhaltet. Demnach sind die Abflusskoeffizienten auf Böschungsskala eher vergleichbar mit den ungünstigen Dispositionen auf Profilskala.

3 Überwachung der Dynamik

3.1 Kastenerosimeter

3.1.1 Material und Methode

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in Bedano im Bezirk Lugano Feldmessungen mit den Kastenerosimeter auf 2 Standorten mit 10 Kastenerosimeter über die Jahre 2019, 2020 und 2021 durchgeführt. Damit wird die Situation mit Holzschat auf der gleichen Fläche untersucht wie auch mit dem Regensimulator auf Profilskala, jedoch über lange Zeitspannen. Mit den Kastenerosimeter kann der Waldboden auf einer Fläche von 7.5 m² kontrolliert überwacht werden unter dem Einfluss der natürlichen Regenerereignisse. Der verwendeten Kastenerosimeter wurde von der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft entwickelt (Figur 15). Ein Kastenerosimeter schliesst eine Fläche mit einer Länge von 5 m und einer Breite von 1.5 m ein und damit Abfluss und Erosion aus der umgebenden Fläche aus. Hangabwärts dieser Fläche ist eine Abflusssammler sowie ein Erosionssammler installiert. Mit diesem System können weniger Komponenten der Wasserbilanz erfasst werden als mit den Regensimulatoren, dafür zusätzliche Variablen zur Bodendynamik und dies auf lange Zeitspannen aufskaliert (Tabelle 6).



Abbildung 15: Beispiel für ein Kastenerosimeter für die Überwachung der Dynamik auf der Bestandesfläche im Bezirk Lugano.

Tabelle 6: Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit den Kastenerosimeter

Messgrösse	Einheit	Beschreibung
Abflussvolumen	dm ³	Volumen des Wassers gesammelt im Kastenerosimeter nach jedem grösseren Regenereignis.
Erosionsmasse	g	Masse der Feststoffe gesammelt im Kastenerosimeter nach jedem grösseren Regenereignis.
Regenvolumen	dm	Volumen des Wassers gemessen mit den Regenwaagen aggregiert auf die Skala eines Tages.
Wassergehalt	dm ³ *m ⁻³	Anteil des Wassers am Volumen des Bodens gemessen mit den Feuchtigkeitssensoren.
Saugspannung	cm	Spannung des Wassers im Bodens gemessen mit den Saugspannungssensoren.
Stoffkonzentration	mg*dm ⁻³	Anteil von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Wasser gesammelt mit den Kastenerosimeter nach einigen ausgewählten Regenereignissen.
Bodenbedeckung	dm ² *m ⁻²	Anteil der Blattstreu und Vegetation an der Oberfläche der Kastenerosimeter gemessen nach einigen ausgewählten Regenereignissen.

Der Bezug für die Feldmessungen mit den Kastenerosimeter sind die Standorte, welche räumlich durch ähnliche Eigenschaften bezüglich der Vegetation definiert sind. Auf jedem Standort werden zwischen 2 und 8 Kastenerosimeter installiert, so dass diese eine möglichst gleichförmige Fläche einschliessen. Dabei wird der Rahmen der Kastenerosimeter mindestens bis zu einer Tiefe von 5 cm in den Boden eingebracht. Als Ergänzung zu den Kastenerosimeter sind auf jedem Standort zwischen 1 und 2 Messstationen mit einer Regenwaage sowie Feuchtigkeitssensoren und Saugspannungssensoren im Boden installiert. Dabei ist die Regenwaage in einer Höhe von 1 m über dem Boden angebracht, während die Feuchtigkeitssensoren und Spannungssensoren in Tiefen von 30 cm, 50 cm und 100 cm in aufgeschütteten Profilen eingebracht

sind. Während die Regenwaagen, die Feuchtigkeitssensoren und die Saugspannungssensoren die Daten regelmässig automatisch erheben, werden die anderen Daten nach jedem grösseren Regenereignis mit einer Regenhöhe grösser als 3 mm manuell erhoben.

3.1.2 Resultate Situation Holzschlag

Die Situation mit Holzschlag ist dadurch definiert, dass auf einer Fläche in der Grössenordnung von mehreren Hektaren alle Bäume vor einigen Jahren entnommen wurden. Als Kontrolle zur dieser Schlagfläche gibt es die benachbarte Bestandesfläche, auf der keine Bäume entnommen wurden und von der angenommen werden kann, dass der Bestand ähnlich wie vor dem Holzschlag auf der Schlagfläche ist. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Situation mit Holzschlag in 1 Gebiet auf 2 Standorten untersucht (Figuren 16 und 18).

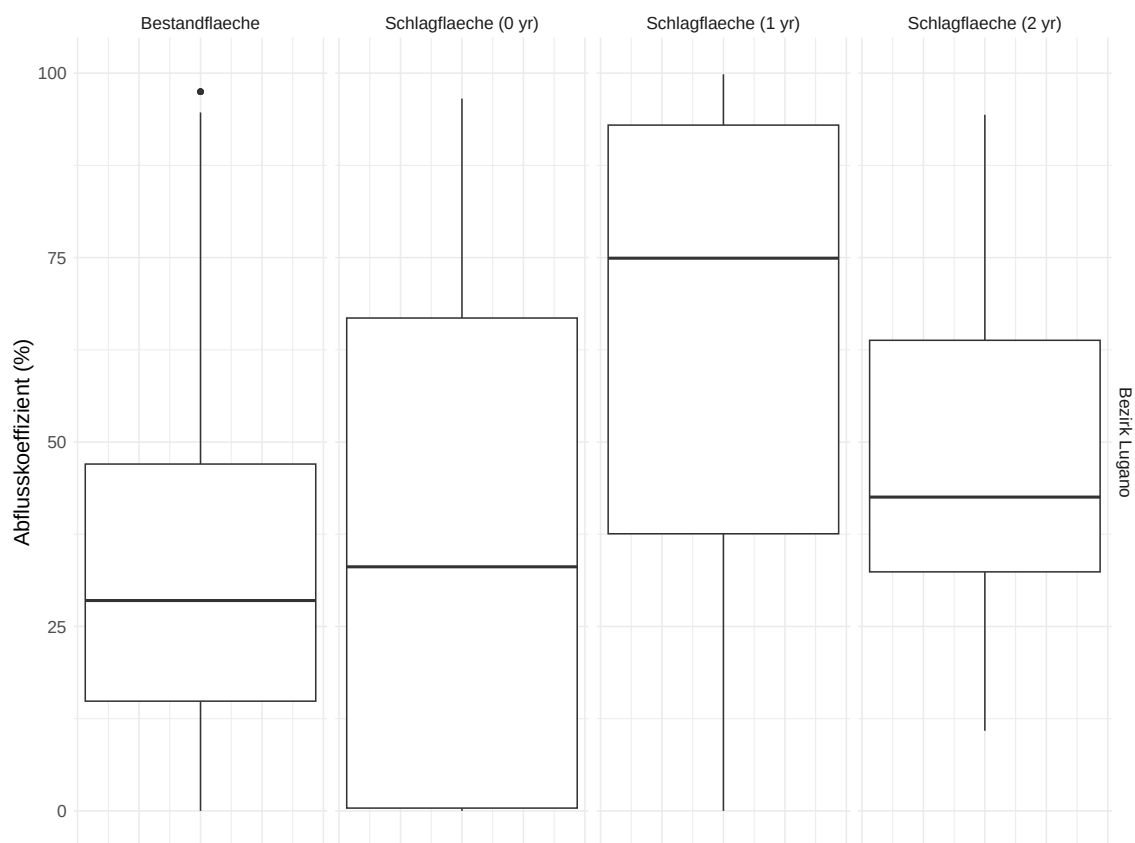


Abbildung 16: Quantifizierung der Abflussbildung mit den Abflusskoeffizient pro Regenereignis für die beiden Waldzustände ohne Holzschlag und nach dem Holzschlag in Bedano.

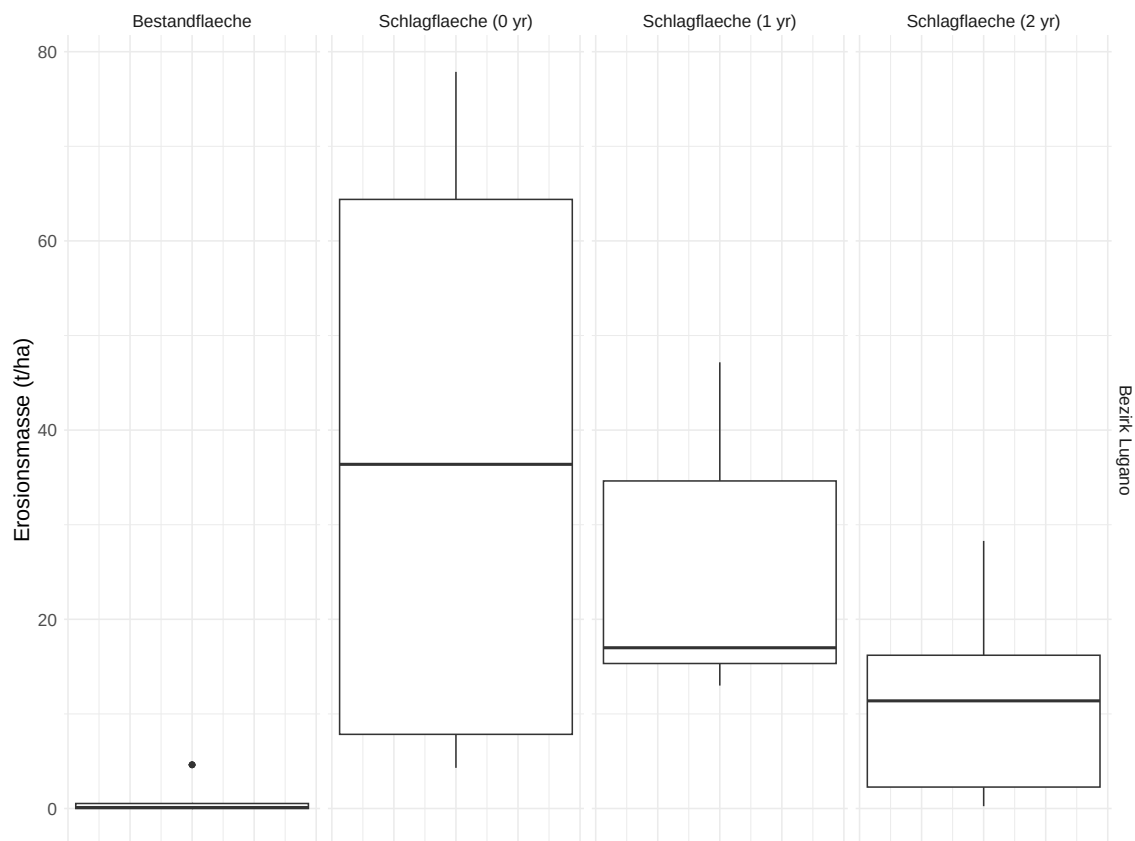


Abbildung 17: Quantifizierung der Erosionsanfälligkeit mit der Erosionsmasse pro Jahr für die beiden Waldzustände ohne Holzschlag und nach dem Holzschlag in Bedano.

Im untersuchten Gebiet zeigen sich signifikante Unterschiede der Abflusskoeffizienten und der Erosionsmasse aufgrund des Holzschlags. Die Erhöhung der Abflusskoeffizienten auf der Schlagfläche beträgt 22 % nach 0 yr, 31 % nach 1 yr und 15 % nach 2 yr. Die Erhöhung der jährlichen Erosionsmasse auf der Schlagfläche beträgt $36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ nach 0 yr, $24 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ nach 1 yr und $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ nach 2 yr. Diese Situation mit Holzschlag für die Kastenerosimeter bezieht sich auf die gleiche Fläche wie für die Beregnungsexperimente auf Profilskala, mit denen eine ähnliche Zunahme der Abflusskoeffizienten gemessen wurden. Die Details zur Überwachung der Dynamik mit Schwerpunkt auf die Oberflächenerosion mit den Kastenerosimeter sind in der Fallstudie Bedano dokumentiert (Beilage 3).

3.2 Drohnenbilder

3.2.1 Material und Methoden

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in Bedano im Bezirk Lugano zusätzlich zu den Feldmessungen mit den Kastenerosimeter auch Drohnenbilder der Schlagfläche in den Jahren 2019, 2022 und 2023 aufgenommen. Damit wird die Situation mit Holzschlag auf der Schlagfläche mit einer flächigen Erhebung ergänzt. Mit den Drohnenbildern können Daten zur Bodenoberfläche mit einer Auflösung in der Grössenordnung von einigen cm über die gesamte Schlagfläche aufgenommen werden. Diese ergänzen die mit den Kastenerosimeter erhobenen Daten zur Oberflächenerosion sowie zur Bodenbedeckung der Vegetation (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit den Drohnenbilder

Messgrösse	Einheit	Beschreibung
Farbwert	-	Farbwerte der Spektralbänder rot, grün und blau für jeden Messpunkt.
Höhenlage	m	Höhenlage der Oberfläche für jeden Messpunkt.

Aus den Farbwerten der Spektralbänder kann ein Orthomosaik und aus der Höhenlage der Oberfläche ein Oberflächenmodell berechnet werden. Für die Auswertung wird in einem ersten Schritt ein Vegetationsindex aus dem Orthomosaik für die Identifizierung der Vegetation berechnet. Mit dem Oberflächenmodell wird dann mit der Differenz zwischen zwei Drohnenbildern das Erosionsvolumen für Rasterzellen ohne Vegetation und der Vegetationszuwachs für Rasterzellen mit Vegetation berechnet.

3.2.2 Resultate Situation Holzschlag

Die Situation mit Holzschlag im Rahmen der Drohnenbilder ist die gleiche Fläche wie für die Kastenerosimeter, es gibt jedoch keine Kontrolle mit der benachbarten Bestandesfläche. Das aus den Drohnenbildern abgeleitet Erosionsvolumen ist eine flächige Ergänzung zu der mit den Kastenerosimetern gemessenen Erosionsmasse und kann über die Annahme einer Bodendichte zwischen 1 und 2 t*m⁻³ mit diesem verglichen werden (Figur 18).

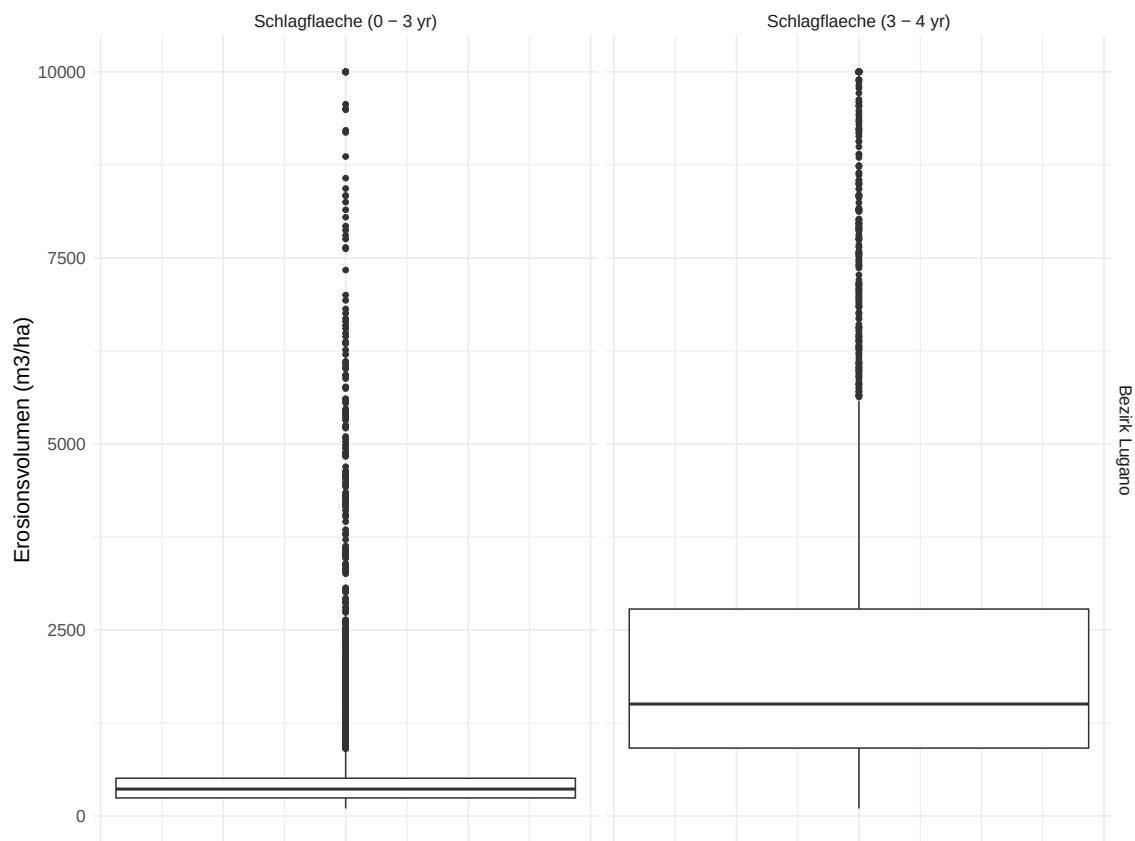


Abbildung 18: Quantifizierung der Erosionsanfälligkeit mit dem Erosionsvolumen pro Jahr für die Fläche mit Holzschlag in Bedano.

Die Drohnenbilder zeigen im Durchschnitt über die Schlagfläche ein jährliches Erosionsvolumen von $521 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ zwischen 2019 und 2022 sowie von $2763 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ zwischen 2022 und 2023. Demnach ergeben sich aus den Drohnenbildern tendenziell höhere Werte für die Oberflächenerosion als mit den Kastenerosimetern. Weiterhin zeigen die Drohnenbilder sich im Gegensatz zu den Kastenerosimetern eine Zunahme der Oberflächenerosion über die Zeit. Die Details zur Überwachung der Dynamik mit Schwerpunkt auf die Oberflächenerosion mit den Drohnenbilder sind in der Fallstudie Bedano dokumentiert (Beilage 3).

4 Parametrisierung der Prozesse

4.1 Charakterisierung der Standorte

4.1.1 Material und Methode

Für alle Beregnungsexperimente werden zusätzliche Daten zum Boden und zur Vegetation gesammelt, um eine Grundlage für eine quantitative Charakterisierung der Standorte zu schaffen (Tabelle 8). Die Messgrössen zum Boden werden mit Ausnahme der Horizonte immer in Schichten mit einer Dicke von 15 cm im Profil erhoben in Anlehnung an die Datenerhebungen zum Wurzelbündelmodell (RBM). Die Horizonte im Profil werden von diesen Schichten unabhängig nach dem System von NaiS erhoben. Die Messgrössen zur Vegetation werden nach dem Verfahren des LFI mit Probekreisen um die Profile erhoben, wobei noch innere Probekreise zur Erfassung von kleineren Bäumen hinzugefügt werden.

Tabelle 8: Übersicht zu den Messgrössen zur Charakterisierung der Standorte

Messgrösse	Einheit	Beschreibung
Horizontmächtigkeit	cm	Dicke der identifizierten und klassifizierten Horizonte im Profil.
Durchlässigkeit	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	Geschwindigkeit der Infiltration in den Boden gemessen mit einem einfachen Infiltrometer in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Porosität	$\text{dm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	Anteil des Volumens der Poren gemessen mit einem Sedimentationsversuch in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Feinerdeanteil	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Anteil der Masse von Ton und Schluff gemessen mit einem Sedimentationsversuch in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Grobbodenanteil	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Anteil der Masse von Sand und Kies gemessen mit einem Sedimentationsversuch in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Azidität	pH	Aktivität der Protonen im Boden abgeschätzt mit einem einfachen Pehameter in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Wurzeldichte	$\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	Anteil der Fläche der Wurzeln gemäss Anzahl und Durchmesser in Schichten mit einer Dicke von 15 cm.
Stammdurchmesser	cm	Durchmesser der Bäume gemessen in Probekreisen um die Profile.
Stammzahl	ha^{-1}	Anzahl der Bäume gemessen in Probekreisen um die Profile.

Während die Horizontmächtigkeit, die Durchlässigkeit, die Azidität, die Wurzeldichte, der Stammdurchmesser und die Stammzahl am ungestörten System im Feld erhoben werden, müssen die Porosität, die Feinerdeanteil und der Grobbodenanteil am gestörten System im Labor bestimmt werden. Für diese Analyse im Labor wird ein Standardverfahren für die Bodenanalyse verwendet, welches in einem anderen Forschungsprojekt entwickelt wurde (Beilage 4). Das Verfahren basiert auf den Dichteunterschieden zwischen Wasser und Boden, wodurch über die Massenbilanz und die Sinkgeschwindigkeit die entsprechenden Messgrößen einfach und günstig bestimmt werden können. Zusammen ergeben diese Messgrößen eine systematische Übersicht zu für Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion relevanten Eigenschaften deren Verknüpfung zum Wald.

4.1.2 Standortsteckbriefe

Zur Übersicht der Daten zu den Standorten und zur Verknüpfung mit den Daten aus den Beregnungsexperimenten werden die Standortsteckbriefe Abfluss für alle untersuchten Standorte erstellt (Beilage 5). Diese basieren auf einer Aufbereitung der erhobenen Daten spezifisch für diese Standorte ohne weiterführende Parametrisierung.

4.2 Auswertung der Daten

4.2.1 Material und Methode

Mit der Auswertung der Daten soll eine Parametrisierung der Prozesse als Grundlage für praktische Anwendungen geschaffen werden. Die Auswertung der Daten mit dem Schwerpunkt auf die Oberflächenerosion ist in der Fallstudie Bedano im Detail beschrieben (Beilage 3). Die Auswertung zum Teilbereich der Messung der Prozesse wird mit dem Schwerpunkt auf den Oberflächenabfluss und mit Hinblick auf die Anwendung in der Hochwasserabschätzung durchgeführt. Die grundlegenden Konzepte für die Auswertung des Oberflächenabflusses werden an das Modell ZEMOKOST angelehnt mit einem Abflusskoeffizienten im stationären Zustand und einer Benetzungsdauer um diesen näherungsweise zu erreichen. Dabei wird angenommen, dass dieser Abflusskoeffizient nicht von den Anfangsbedingungen abhängig ist, die Benetzungsdauer jedoch schon.

Die Grundlage für die Berechnung der Abflusskoeffizienten sind die gemessenen Daten zur Regenrate r (mm/hr) und zur Abflussrate q (mm/hr), wobei die Abflussrate den gesamten oberflächenahen Abfluss beinhaltet. Der Abflusskoeffizient im stationären Zustand wird als Spitzenabflusskoeffizient ψ (-) formuliert (Gleichung 1). Ergänzend dazu wird ein Summenabflusskoeffizient ϕ (-) definiert, welcher ebenfalls oft für die Hochwasserabschätzung verwendet wird (Gleichung 2). Die Annäherung an den stationären Zustand in den mit den Beregnungsexperimenten gemessenen Daten wird basierend auf der Annahme bestimmt, dass der Summenabflusskoeffizient später konvergiert als der Spitzenabflusskoeffizient. Demnach wird der Summenabflusskoeffizient am Endpunkt als Grenzwert für den Spitzenabflusskoeffizient angenommen und der stationäre Zustand dadurch definiert, wenn dieser Grenzwert überschritten ist.

$$\psi = \frac{q}{r} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\int (q * dt)}{\int (r * dt)} \quad (2)$$

Die Benetzungsdauer wird als Funktion vom Abflusskoeffizienten und vom Sättigungskoeffizienten σ (-) formuliert. Dieser Ansatz ist angelehnt an das Modell ZEMOKOST und wird entsprechend modifiziert für eine quantitative Berücksichtigung des Anfangszustands ¹. Dafür wird der Sättigungskoeffizient definiert als Verhältnis des Wassergehalts w (-) im Anfangszustand zur Porosität n (-) im Profil (Gleichung 3). Dies ergibt eine modifizierte Funktion für die Benetzungsdauer, welche mit zunehmendem Abflusskoeffizienten und mit zunehmendem Sättigungskoeffizienten abnimmt (Gleichung 4).

$$\sigma = \frac{\int (w * dz)}{\int (n * dz)} \quad (3)$$

$$\tau = \tau_0 - \tau_1 * \ln(\psi) - \tau_2 * \exp(\sigma) \quad (4)$$

Der Abflusskoeffizient wird als Funktion der Regenrate und der Durchlässigkeit k (mm/hr) formuliert. Dieser Ansatz ist angelehnt an das Modell ZEMOKOST und wird entsprechend modifiziert, um auch den Einfluss der Durchlässigkeit auf den Abflusskoeffizienten zu berücksichtigen. Dafür wird von einem einfachen physikalischen Ansatz ausgegangen, dass die Abflussrate im stationären Zustand der Differenz zwischen der Regenrate und der Infiltrationsrate f (mm/hr) entspricht (Gleichung 5). Für die Beziehung zwischen der Infiltrationsrate, der Regenrate und der Durchlässigkeit wird ein einfacher statistischer Ansatz angenommen ². Demnach ist die Infiltrationsrate bei einem Regenereignis eine Funktion der Regenrate und der Durchlässigkeit im Sinne der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (Gleichung 6). Dies ergibt eine modifizierte Funktion für den Abflusskoeffizienten, welcher mit zunehmender Regenrate zunimmt und mit zunehmender Durchlässigkeit abnimmt (Gleichung 7).

$$\psi = \frac{r - \psi_0 * f}{r} \quad (5)$$

$$f = k * (1 - \exp(-\frac{r}{k})) \quad (6)$$

$$\psi = 1 - \psi_0 * (\frac{k}{r}) * (1 - \exp(-\frac{r}{k})) \quad (7)$$

Mit dieser Parametrisierung können der Abflusskoeffizient und die Benetzungsdauer auf verschiedene Regenraten umgerechnet und anhand von Messungen oder Annahmen zur Durchlässigkeit abgeschätzt werden. Weiterhin sind die beiden Werte damit vergleichbar mit den Abflussklassen des Modells ZEMOKOST und können entsprechend interpretiert und verwendet werden.

¹Stepanek, L and Kohl, B und Markart, G. 2004. Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. Internationales Symposium Interpraevent 2004

²Langhans, C and Govers, G and Diels, J and Leys, A and Clymans, W and Van den Putte, A. 2011. Experimental rainfall-runoff data: Reconsidering the concept of infiltration capacity. Journal of Hydrology

4.2.2 Abflusstabelle

Als Grundlage für die Anwendung für die Hochwasserabschätzung und andere hydrologische Fragestellungen im Wald werden die Daten aus den Beregnungsexperimenten parametrisiert und in der Abflusstabelle Wald zusammengefasst (Beilage 1). Dafür werden der Abflusskoeffizient und die Benetzungsdauer gleich wie für die Abflussklassen des Modells ZEMOKOST auf eine Regenrate von 100 mm/hr und für einen pessimistischen Anfangszustand mit einem Sättigungskoeffizienten von näherungsweise 100 % normiert.

Die Parametrisierung der Benetzungsdauer als Funktion des Abflusskoeffizienten und des Sättigungskoeffizienten über alle Daten ergibt ein R^2 von 5 % mit Werten von 18 min für τ_0 , von 3 min für τ_1 und von 1 min für τ_2 . Die Abhängigkeit der Benetzungsdauer vom Abflusskoeffizient ist nur schwach ausgeprägt und nur schwach von Variabilitäten des Sättigungskoeffizienten beeinflusst (Figur 19). Die Abhängigkeit der Benetzungsdauer vom Sättigungskoeffizient ist ebenfalls nur schwach aber stärker von Variabilitäten des Abflusskoeffizienten beeinflusst (Figur 20).

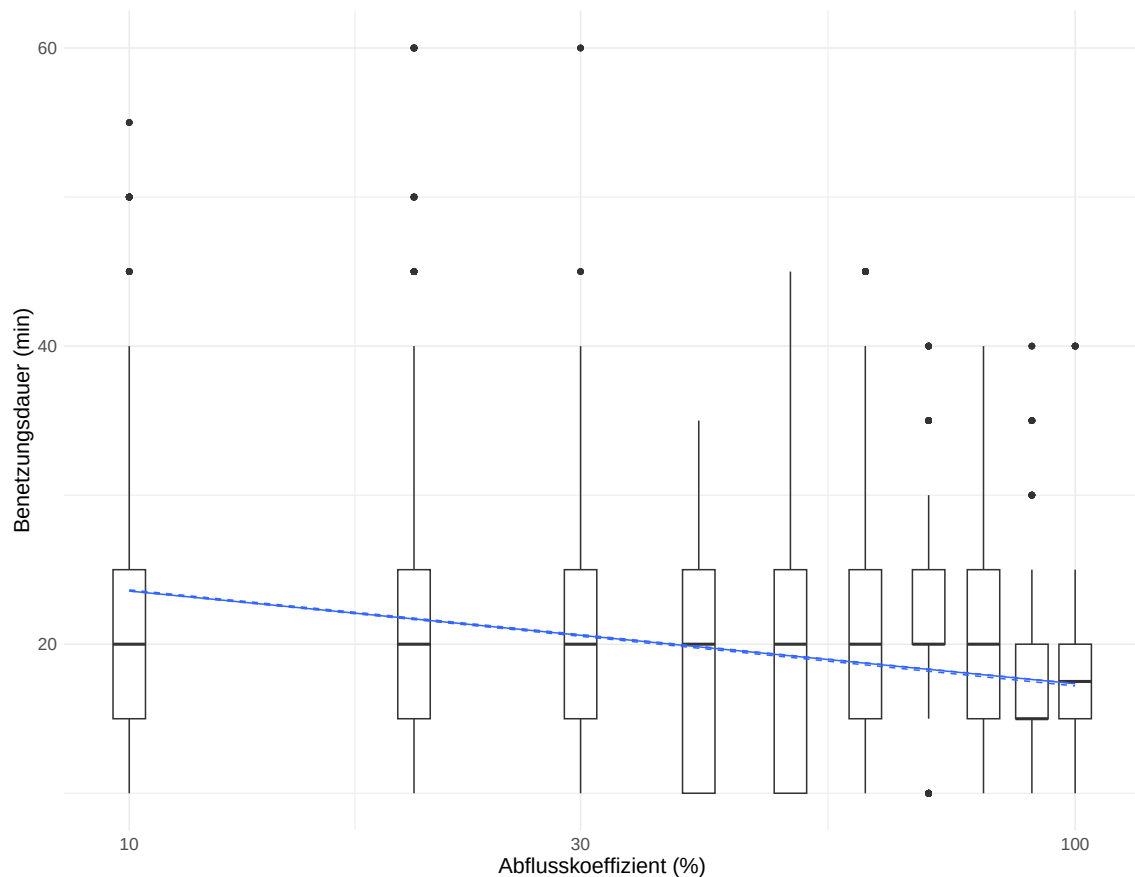


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Benetzungsdauer und dem Abflusskoeffizient mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).

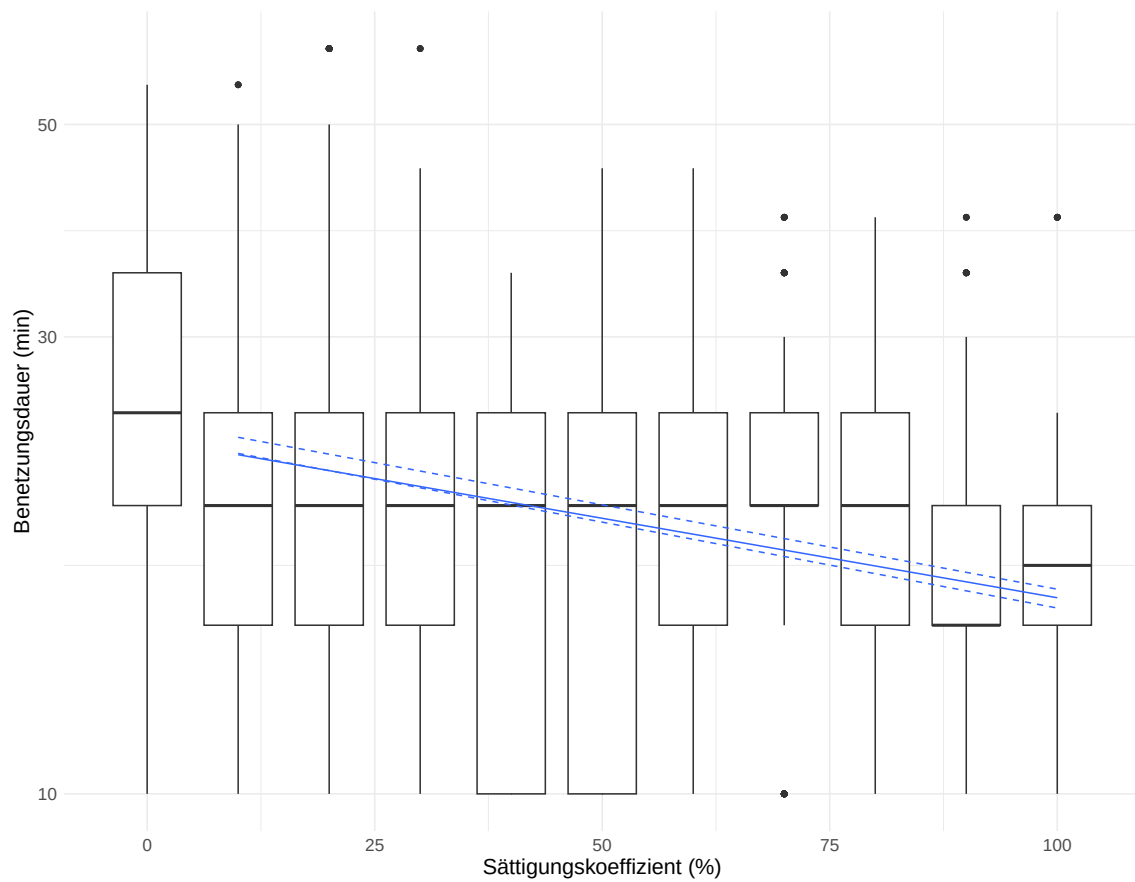


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen der Benetzungsdauer und dem Sättigungskoeffizient mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).

Die Parametrisierung des Abflusskoeffizienten als Funktion der Regenrate und der Durchlässigkeit über alle Daten ergibt ein R^2 von 91 % mit einem Wert von 77 % für ψ_0 . Die Abhängigkeit des Abflusskoeffizienten vom der Regenrate ist nur schwach ausgeprägt und aber stark von Variabilitäten der Durchlässigkeit beeinflusst (Figur 21). Die Abhängigkeit des Abflusskoeffizienten von der Durchlässigkeit ist stärker aber schwächer von Variabilitäten im Abflusskoeffizienten beeinflusst (Figur 22).

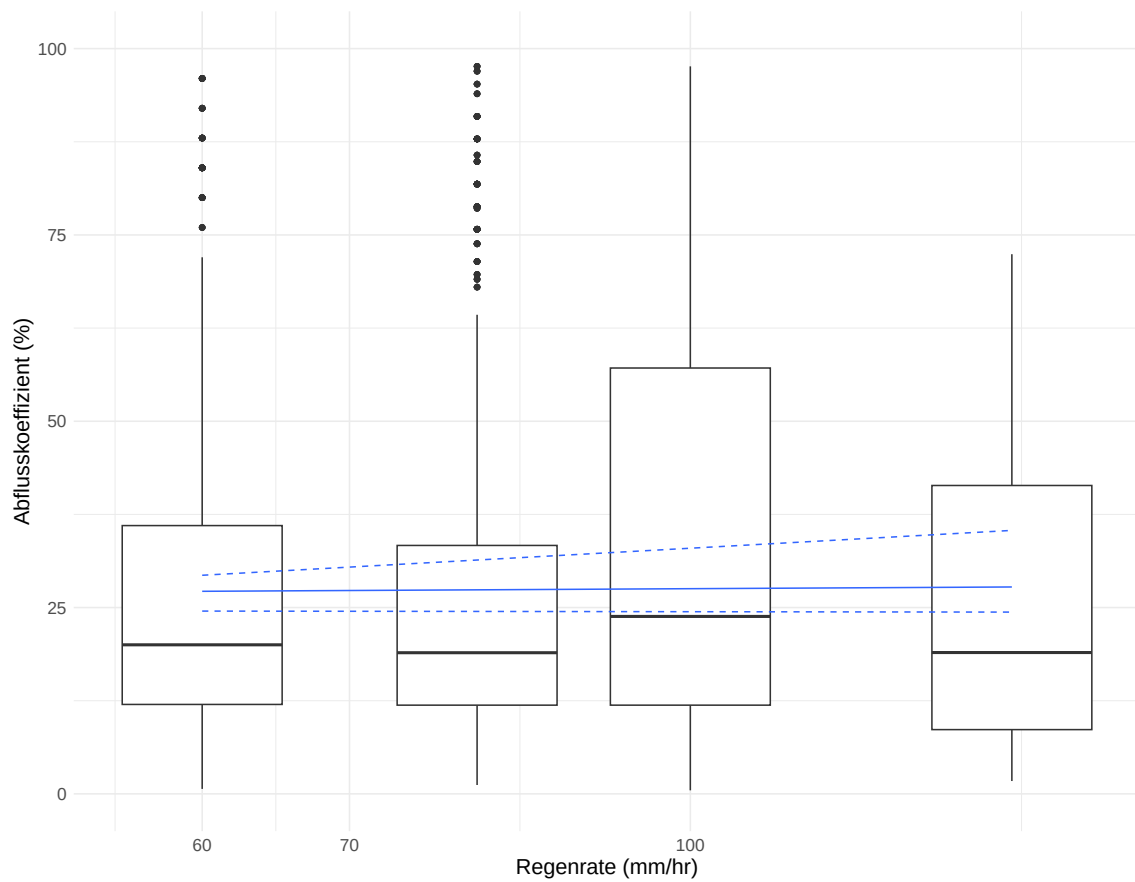


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem Abflusskoeffizient und der Regenrate mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).

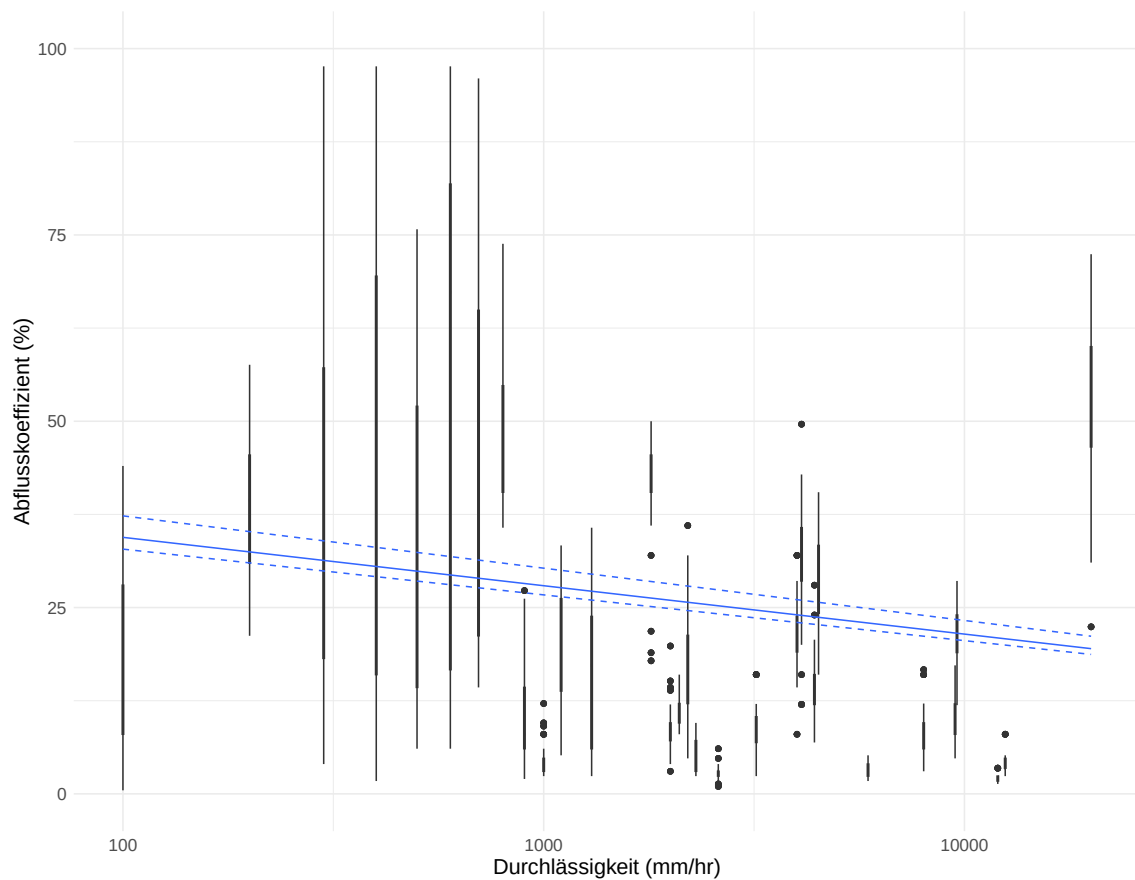


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen dem Abflusskoeffizient und der Durchlässigkeit mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).

Diese Analyse zeigt, dass die angesetzte Parametrisierung die Variabilitäten in den gemessenen Daten nur bedingt zu abbilden vermag. Dabei hat die Parametrisierung des Abflusskoeffizienten eine deutlich höhere Güte als die Parametrisierung der Benetzungsdauer. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Benetzungsdauer von verschiedenen Faktoren abhängig ist, welche mit dem Abflusskoeffizienten und dem Sättigungskoeffizienten nicht alle erfasst werden. Dennoch kann dieser Ansatz für eine Abschätzung verwendet werden und berücksichtigt auch explizit den Einfluss der Infiltrationskapazität auf den Oberflächenabfluss im stationären Zustand. Der Einfluss der Speicherkapazität wird mit diesem Ansatz nur implizit in der Abschätzung der Benetzungsdauer berücksichtigt. Für eine detailliertere Berechnung der Benetzungsdauer müsste die Speicherkapazität explizit und die Infiltrationskapazität zeitaufgelöst berücksichtigt werden, um so Infiltrationskurven beziehungsweise Abflusskurven und deren Annäherung an einen stationären Zustand zu abbilden.

5 Ausblick

5.1 Schlussfolgerungen

Mit den in diesem Forschungsprojekt erhobenen Daten wird eine Grundlage geschaffen, um den Oberflächenabfluss im Wald abhängig von unterschiedlichen Situationen abschätzen zu können. Dabei zeigt sich eine grosse Variabilität in den Werten der Abflusskoeffizienten, welche sich über weitaus grössere Bereiche erstreckt als die tabellierten Werte im oft verwendeten System von HAKESCH. Diese Werte werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst, deren Einfluss kaum für sich alleine sondern nur im Verbund mit anderen erfasst werden kann. Zwar kann der Oberflächenabfluss theoretisch mit der Infiltrationskapazität und der Speicherkapazität zeitlich aufgelöst berechnet werden, aber diese beiden Parameter können praktisch nicht alle Einflüsse berücksichtigen und müssen deshalb durch Messungen bestimmt werden.

Deshalb wird dafür eine einfache Parametrisierung vorgeschlagen, welche anhand der Durchlässigkeit und der Regenrate eine Abschätzung des Abflusskoeffizienten im stationären Zustand ermöglicht. Die Durchlässigkeit kann dabei mit einem einfachen Zylinderinfiltrometer abgeschätzt werden, welches zumindest die Grössenordnung der Werte mit wenig Aufwand erfassen kann. Dieser einfache Ansatz zeigt zwei allgemeine Befunde auf, welche in der Hochwasserabschätzung oft nicht berücksichtigt werden aber wichtig sein können. Erstens ist der Abflusskoeffizient keine Konstante sondern eine Variable abhängig von der Regenrate und vor dem stationären Zustand auch von der Regendauer. Zweitens kann die Durchlässigkeit nicht mit der Infiltrationsrate bei einem Regenereignis gleichgesetzt werden und ist ebenfalls abhängig von der Regenrate. Mit einer Messung der Durchlässigkeit des Oberbodens und einer Annahme für die Regenrate kann der Abflusskoeffizient im stationären Zustand und damit die Abflussklasse gemäss ZEMOKOST abgeschätzt werden, wenn auch mit einigen Unsicherheiten.

Die Untersuchung der verschiedenen Situationen hat gezeigt, dass die Eigenschaften des Oberbodens wesentlich zur Disposition für Oberflächenabfluss beitragen. In vielen der untersuchten Situationen zu Holzschlag, Wilddruck und Waldbrand sind die Durchwurzelung auch auf den gestörten Flächen noch vorhanden und die Eigenschaften des Unterbodens vergleichbar. Nur in den oberflächlichen Bodenschichten zeigen sich ein tendenziell verringerte Werte der Durchlässigkeit und der Porosität auf den gestörten Flächen. Diese Werte können nur sinnvoll in den mineralischen Horizonten aber kaum in den organischen Horizonten gemessen werden, was ein quantitatives Verständnis erschwert. Weiterhin zeigen die Situationen der Bodenbedeckung, dass auch die Bodenvegetation einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der oberflächlichen Bodenschichten haben und die Infiltrationskapazität auf schlecht durchlässigen Böden entscheidend verändern kann.

Die untersuchten Situationen zum Bestandeszustand zeigen weiterhin einen Einfluss von Eigenschaften des Bestandes auf die Disposition für Oberflächenabfluss, welcher allerdings geringer ist als der Einfluss der Störungen. Der Einfluss der Bestandeszustände kann vor allem auf Unterschiede in der Durchwurzelung und damit der Infiltrationskapazität des Bodens zurückgeführt werden, welche sowohl von der Position im Bestand, dem Alter des Bestandes und der Zusammensetzung des Bestandes abhängig ist. Die Zusammensetzung wird vermutlich auch einen Einfluss haben über die biologische Aktivität des Bodens abhängig von den Eigenschaften der Streu, eine solche Situation wurde jedoch noch nicht untersucht.

Die Komplexität des Oberflächenabflusses im Wald ergibt sich aus den direkten und indirekten Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und dem Boden. Zwar ist die Vegetation vor allem auf schlecht durchlässigen Böden wichtig, aber diese Untersuchungen zeigen dennoch auch einen bedeutenden Einfluss auf gut durchlässigen Boden. Meistens sind diese zwar weniger kritisch, es können aber auch ungünstige Zustände vermieden werden. Tendenziell sollte ein Bestand einen lockeren Schlussgrad und eine mehrschichtige Struktur aufweisen, damit Durchwurzelung hoch und regelmässig ist und dennoch genügend Licht für die Bodenvegetation verfügbar ist. Weiterhin sollten wenn möglich Baumarten mit tief reichendem Wurzelwerk und mit gut abbaubarer Streu zumindest eingemischt werden, um die Durchwurzelung und die biologische Aktivität im Boden zu erhöhen.

5.2 Weiterführung

Mit diesem Forschungsprojekt wird eine Grundlage für forsthydrologische Daten zu Waldstandorte in der Schweiz geschaffen, welche systematische Erhebungen zum Wald, zum Boden und zur Hydrologie beinhaltet. Damit konnten bereits einige wichtige Erkenntnisse zum hydrologischen Verhalten und zu unterschiedlichen Situationen gewonnen und eine einfache Parameterisierung für den Oberflächenabfluss aufgestellt werden. Damit sind aber erst eine kleine Auswahl der Waldstandorte abgedeckt und für eine komplexere Parametrisierung in einem Modell gibt es noch zu viele Unklarheiten. Bis hin zu einem umfassenden quantitativen Verständnis über den Hochwasserschutzwald braucht es deshalb noch weitere Forschungsarbeit.

Einerseits müssen allgemein weitere Daten gesammelt und auch bestehende Daten soweit wie möglich einbezogen werden. Letzteres ist jedoch oft nur eingeschränkt möglich, da häufig quantitative Angaben zum Standort fehlen. Weiterhin braucht es vor allem spezifische forsthydrologische Daten, um den Einfluss der Durchwurzelung und vor allem der Bodenbedeckung besser quantifizieren zu können. Mit diesem Forschungsprojekt wurde ein allgemeiner Ansatz für die Quantifizierung der Faktoren und Prozesse aufgezeigt, jedoch braucht es für die spezifischen Details zur Interaktion zwischen Wald und Boden noch ergänzenden Ansätze auf dem Weg zu einer umfassenden Parametrisierung. Während der Einfluss der Durchwurzelung auf der Grundlage von Wurzelbündelmodellen (RBM) und Fliessgesetzen relativ einfach abgebildet werden kann, ist vor allem der Einfluss der Bodenbedeckung und der damit verbundenen biologischen Aktivität der oberflächlichen Bodenschichten schwierig zu erfassen.

Andererseits muss für eine Anwendung in der Hochwasserabschätzung ein Modell entwickelt werden, welches eine Berechnung des Oberflächenabflusses aus der Infiltrationskapazität und der Speicherkapazität ermöglicht, welche wiederum mit Eigenschaften des Waldes und des Bodens geschätzt werden. Ein solches Modell ist notwendig, weil unmöglich alle Waldstandorte und Situationen vermessen werden und weil damit auch Veränderung abgeschätzt werden können. Dafür braucht es eine umfassende Parametrisierung für die Interaktion zwischen dem Wald und dem Boden, damit unterschiedliche Kombinationen und Zustände abgebildet werden können. Die Perspektive einer landesweiten Bodenkartierung eröffnet dabei neue Möglichkeiten, um in der Kombination mit quantitativen Erkenntnissen der Forsthydrologie flächige Grundlagen für hydrologische Modellierungen zu schaffen. Diese können von grosser Bedeutung sein für die Quantifizierung von Gefahren und Risiken von Wasserprozessen sowie in der Massnahmenplanung und im Schutzwaldmanagement, insbesondere im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald und auf die Hydrologie.

Beilagen

- ▶ Beilage 1: Abflusstabelle Wald
- ▶ Beilage 2: Artikel Abfluss Wilddruck
- ▶ Beilage 3: Fallstudie Bedano
- ▶ Beilage 4: Projektbericht Standardverfahren Bodenanalyse
- ▶ Beilage 5: Standortsteckbriefe Abfluss

Abbildungsverzeichnis

1	Karten mit allen untersuchten Standorten im Rahmen des Forschungsprojekts mit den Waldstandortsregionen als Hintergrund.	7
2	Beispiel für den Regensimulator auf Profilskala im Einsatz auf der Schlagfläche in der Gemeinde Eschen.	11
3	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Holzschlag.	13
4	Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Holzschlag.	14
5	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Wilddruck.	15
6	Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Wilddruck.	16
7	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Störung durch Waldbrand.	17
8	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden in der Bodenbedeckung.	18
9	Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden in der Bodenbedeckung.	19
10	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.	20
11	Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.	21
12	Beispiel für den Regensimulator auf Böschungsskala im Einsatz auf der Tannenfläche in der Gemeinde Rüschegg.	23
13	Quantifizierung der Abflussbildung mit Abflusskoeffizienten im stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.	25
14	Quantifizierung der Abflussbildung mit Benetzungsdauer bis zum stationären Zustand für die Situationen mit Unterschieden im Bestandeszustand.	26
15	Beispiel für ein Kastenerosimeter für die Überwachung der Dynamik auf der Bestandesfläche im Bezirk Lugano.	28
16	Quantifizierung der Abflussbildung mit den Abflusskoeffizient pro Regenereignis für die beiden Waldzustände ohne Holzschlag und nach dem Holzschlag in Bedano.	30
17	Quantifizierung der Erosionsanfälligkeit mit der Erosionsmasse pro Jahr für die beiden Waldzustände ohne Holzschlag und nach dem Holzschlag in Bedano.	31
18	Quantifizierung der Erosionsanfälligkeit mit dem Erosionsvolumen pro Jahr für die Fläche mit Holzschlag in Bedano.	33
19	Zusammenhang zwischen der Benetzungsdauer und dem Abflusskoeffizient mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).	38
20	Zusammenhang zwischen der Benetzungsdauer und dem Sättigungskoeffizient mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).	39
21	Zusammenhang zwischen dem Abflusskoeffizient und der Regenrate mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).	40

22	Zusammenhang zwischen dem Abflusskoeffizient und der Durchlaessigkeit mit den gemessenen Daten (schwarz) und der modellierten Tendenz (blau).	41
----	---	----

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht zu allen untersuchten Standorten im Rahmen des Forschungsprojekts und den durchgeführten Arbeiten.	8
2	Übersicht zu den Feldarbeiten mit dem Regensimulator auf Profilskala	10
3	Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit dem Regensimulator auf Profilskala	12
4	Übersicht zu den Feldarbeiten mit dem Regensimulator auf Böschungsskala	22
5	Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit dem Regensimulator auf Böschungsskala	24
6	Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit dem Kastenerosimeter	29
7	Übersicht zu den Messgrössen erhoben mit den Drohnenbilder	32
8	Übersicht zu den Messgrössen zur Charakterisierung der Standorte	35
