

Forsthydrologische Fallstudie in Bedano

Quantifizierung von Oberflächenerosion und Oberflächenabfluss im Wald

Dokumentation



Autoren: Dominik May, Massimiliano Schwarz
Version: 29. 11. 2024

Impressum

Trägerschaft

Amt für Landwirtschaft und Wald - Kanton Luzern (LAWA-LU)

Amt für Umwelt - Fürstentum Liechtenstein (AU-FL)

Amt für Wald und Naturgefahren - Kanton Bern (AWN-BE)

Amt für Wald und Naturgefahren - Kanton Graubünden (AWN-GR)

Amt für Wald und Naturgefahren - Kanton Nidwalden (AWN-NW)

Sezione Forestale - Repubblica e Cantone Ticino (SF-TI)

Wald und Holz Forschungsfond - Schweizerische Eidgenossenschaft (WHFF-CH)

Verfasser

Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (BFH-HAFL)

Zitiervorschlag

Dominik May, Massimiliano Schwarz. Forsthydrologische Fallstudie in Bedano - Quantifizierung von Oberflächenerosion und Oberflächenabfluss im Wald - Dokumentation. Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften. 2024.

Zusammenfassung

Die hydrologische Waldwirkung kann abhängig von der vorliegenden Disposition wesentlich zum Schutz gegen Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion beitragen und sollte deshalb bei waldwirtschaftlichen Massnahmen auf anfälligen Standorten berücksichtigt werden. Diese Gegebenheit ist oft der Fall bei der veränderten Nutzung von Kastanienbeständen in der insurbischen Zone und wird am Beispiel eines Holzschlags in Bedano quantitativ untersucht. Dafür werden Daten zum Oberflächenabfluss und zur Oberflächenerosion aber auch zur Regeninterzeption, zum Bodenwasser, zur Bodenauswaschung und zur Bodenbedeckung erhoben und statistisch ausgewertet. Dies zeigt wesentliche und signifikante Auswirkungen des Holzschlags auf den Wasserhaushalt und die Bodendynamik. Nach dem Holzschlag verschwindet die Regeninterzeption und der Oberflächenabfluss nimmt zu, während der Einfluss auf das Bodenwasser bei einem Regenereignis vernachlässigbar ist. Auch nimmt die Oberflächenerosion und die Bodenauswaschung von Stickstoff und von Phosphor zu, nicht jedoch die von Kohlenstoff. Die Bodenbedeckung hat sich durch den Holzschlag stark verändert von Blattstreu ohne Vegetation über einen nackten Zustand auch ohne Blattstreu zu einer Ansiedlung von Vegetation. Diese Auswirkungen lassen sich vor allem auf Veränderungen der organischen Bodenschichten an der Oberfläche zurückführen, während die mineralischen Bodenschichten vermutlich kaum betroffen sind. Dabei wurde auch festgestellt, dass sich die organischen Bodenschichten erholen und damit die ungünstigen Auswirkungen über die Zeit wieder abschwächen. Auf der Ebene des Teileinzugsgebiets können sie dennoch problematisch sein im Zusammenhang mit der Abflussbildung, der Geschiebefracht und der Eutrophierung der Vorflut. Mit angepassten Ansätzen in der Waldbewirtschaftung unter Berücksichtigung von quantitativen Termen der hydrologischen Waldwirkung lassen sich diese Auswirkung jedoch auf ein akzeptables Ausmass verringern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Methoden	7
2.1	Untersuchungsgebiet	7
2.1.1	Lokalisierung	7
2.1.2	Charakterisierung	8
2.1.3	Installationen	9
2.2	Messstationen	10
2.2.1	Aufbau	10
2.2.2	Auswertung	11
2.3	Kastenerosimeter	12
2.3.1	Aufbau	12
2.3.2	Auswertung	13
2.4	Regensimulator	14
2.4.1	Aufbau	14
2.4.2	Auswertung	15
2.5	Drohnenbilder	16
2.5.1	Durchführung	16
2.5.2	Auswertung	17
3	Resultate	17
3.1	Zeitreihen	17
3.1.1	Regeninterzeption	17
3.1.2	Oberflächenabfluss	21
3.1.3	Oberflächenerosion	28
3.1.4	Bodenwasser	35
3.1.5	Bodenauswaschung	39
3.1.6	Bodenbedeckung	47
3.2	Punktmessungen	53
3.2.1	Oberflächenabfluss	53
3.2.2	Oberflächenerosion	55
3.2.3	Bodenwasser	57
3.3	Flächenaufnahmen	59
3.3.1	Grundlagenkarten	59
3.3.2	Oberflächenerosion	60
3.3.3	Bodenbedeckung	62
3.4	Modellrechnungen	63
3.4.1	Oberflächenabfluss	63
3.4.2	Oberflächenerosion	64
4	Diskussion	66
4.1	Wasserbilanz	66
4.1.1	Regeninterzeption	66

4.1.2	Oberflächenabfluss	67
4.1.3	Bodenwasser	68
4.2	Bodendynamik	68
4.2.1	Oberflächenerosion	68
4.2.2	Bodenauswaschung	69
4.2.3	Bodenbedeckung	70
5	Schlussfolgerungen	70

1 Einleitung

Die Waldwirkung auf den Oberflächenabfluss und die Oberflächenerosion ist eine zentrale Problemstellung in der Forsthydrologie. Diese hydrologische Waldwirkung bietet eine indirekte Schutzwirkung, welche die Abflussbildung und die Geschiebefracht in den Gerinnen beeinflussen und damit die Gefährdung von Schutzgütern durch Wasserprozesse verringern kann [16]. Trotzdem, dass die Waldwirkung auf den Oberflächenabfluss und die Oberflächenerosion im Allgemeinen gut erforscht und qualitativ verstanden ist, bleibt der quantitative Nachweis auf einem spezifischen Standort eine Herausforderung [3]. Weiterhin ist die zeitliche Entwicklung dieser hydrologischen Prozesse nach Störungen noch wenig erforscht aber von grosser praktischer Bedeutung [8]. Nur weitere theoretische und empirische Untersuchungen können zu einem besseren quantitativen Verständnis beitragen.

Die Ausgangslage für diese Untersuchung geht zurück auf ein waldwirtschaftliches Vorhaben, alte und nicht gepflegte Kastanienbestände in der insurbischen Zone nachhaltig und wirtschaftlich zu nutzen [5]. Dafür werden teilweise grossflächige Holzschläge durchgeführt, wodurch sich Fragen zu deren allgemeinen Auswirkungen stellen und im Speziellen auch zu Veränderung der Wasserflüsse zum Verlust von Bodenressourcen. Dies ist in der insurbische Zone deshalb besonders relevant, weil diese Standorte aufgrund des unausgeglichene Niederschlagsregimes und den schluffigen Bodenarten besonders anfällig für Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion sind [6]. Ein solcher Holzschlag auf einem steilen Hang im Sottoceneri bietet eine Fallstudie, um die Auswirkungen auf die Wasserbilanz und die Bodendynamik zu untersuchen. Der Fokus liegt dabei auf der Quantifizierung der zeitlichen Entwicklung von Oberflächenabfluss und Erosion auf der Schlagfläche im Vergleich zu einer benachbarten, unberührten Waldfläche.

Das allgemeine Ziel dieser Untersuchung ist eine Quantifizierung der zeitliche Entwicklung der Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion auf der Schlagfläche gegenüber der Waldfläche. Die spezifischen Fragestellungen betreffen folgende Aspekte. Erstens die Wasserbilanz mit der Regeninterzeption, dem Oberflächenabfluss sowie dem Bodenwasser und zweitens die Bodendynamik mit der Oberflächenerosion, der Bodenauswaschung und der Bodenbedeckung. Im Zuge dessen werden empirische Modelle für den Oberflächenabfluss und die Oberflächenerosion kalibriert, um die räumliche und zeitliche Variabilitäten dieser hydrologischen Prozesse aufskalieren zu können.

Der grundlegende Ansatz dieser Untersuchung ist die Kombination von verschiedenen Zeitreihen mit Messstationen, Kastenerosimetern und Drohnenbildern über 3 y sowie Punktmessungen mit Regensimulatoren. Mit diesen Systemen werden sowohl auf der Schlagfläche wie auch auf der Waldfläche als Kontrolle verschiedene Daten erfasst. Diese Daten sind mit einer permutativen Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Identifizierung der signifikanten Faktoren und mit einem gemischten lineare Modell (LMM) zur Quantifizierung der Effekte analysiert. Die gemischten linearen Modelle werden auch für die Aufskalierung des Oberflächenabflusses und der Oberflächenerosion verwendet.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

2.1.1 Lokalisierung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Gebiet Selvacce in der Gemeinde Bedano im Kanton Tessin. Die Schlagfläche erstreckt sich über 2 ha an einem steilen, ostexponierten Hang. Die südliche daran anschliessende Waldfläche wird als Kontrolle verwendet. Beide Teilflächen liegen in einem 110 ha grossen Einzugsgebiet, welches in den Fluss Vedeggio entwässert.

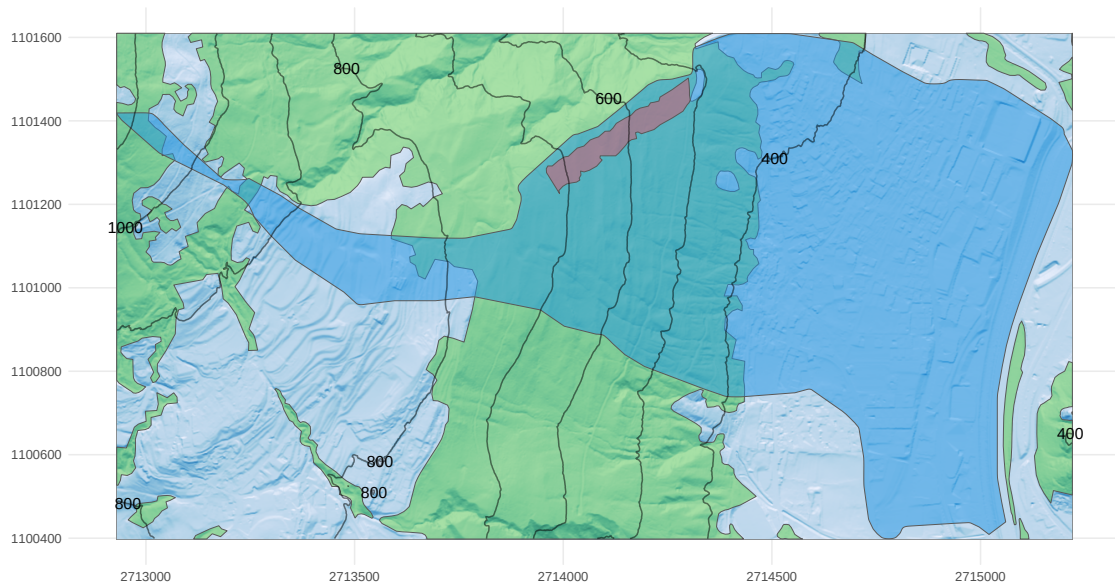


Abbildung 1: Karte zum Untersuchungsgebiet mit dem Einzugsgebiet (blau) der Waldfläche (grün) und in der Schlagfläche (braun) mit Angabe der Höhe über Meer (SWISSALTI3D) referenziert auf die Koordinaten der Landesvermessung (EPSG:2056).

Mit den Grundlagenkarten gemäss der Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS) kann das Untersuchungsgebiet aufgrund seiner Lage forstlich eingeordnet werden (). Demnach liegen beide Teilflächen in der Waldstandortregion der südlichen Randalpen ohne Fichte, in der hyperinsurbischen Höhenstufe im Hauptareal der Tanne.

2.1.2 Charakterisierung

Die Charakterisierung des Untersuchungsgebiets erfolgt sowohl auf der Basis von Grundlagenkarten, Geodatenmodellen und Feldaufnahmen. Aus den Geodatenmodellen werden die Höhe über Meer, der Hangneigung und der Hangexposition zur Beschreibung der Topografie abgeleitet [15]. Die Grundlagenkarten werden zur groben Beschreibung der Geologie verwendet [14]. Mit den Feldaufnahmen werden diese mit einer detaillierten Beschreibung des Bodens und der Vegetation ergänzt.

Tabelle 1: Charakterisierung des Untersuchungsgebiet bezüglich Topografie, Geologie, Boden und Vegetation auf der Basis von Grundlagenkarten und Feldaufnahmen.

Datenquelle	Topografie	Geologie	Boden	Vegetation
Grundlagenkarten	-	Biotit-Plagioklasgneis, Niederterrasse	-	-
Geodatenmodelle	Talflanke (506-722 m), Steilhang (2-60 °), Südostexposition (181-359 °)	-	-	-
Felddaten	-	-	Kryptopodsol mit Mull (OI <0 m, Ah 0-0.15 m, AE 0.15-0.3 m, Bh 0.3-0.6 m, Bv >0.6 m), lehmiger Sand (40 % Kies, 40 % Sand, 20 % Schluff, 0 % Ton)	Nährstoffarmer Eichen-Kastanienwald (42C/Q), Baumholz (Mittelstamm-durchmesser 0.45 m, Stammzahl 500 1/ha)

Diese allgemeine Charakterisierung gilt für beide Teilflächen im Untersuchungsgebiet mit Ausnahme der Entwicklungsstufe der Vegetation. Diese wurde auf der Schlagfläche mit einem grossflächigen Holzschlag im Januar 2019 auf eine Ausgangslage für Niederwald zurückgesetzt. Weil der Waldbestand hauptsächlich aus Kastanien besteht und die Wurzelstöcke im Boden belassen wurden, wird dieser mit dem Holzschlag

nicht vollständig ersetzt, sondern kann über Stockausschlag der alten Wurzelstöcke zurückkommen. Für die Auswertungen wird die verstrichene Zeitspanne nach dem Holzschlag als Sukzessionszeit t (y) definiert.

2.1.3 Installationen

Im Untersuchungsgebiet werden für die Zeitreihen Messstationen (MS) sowie Kastenerosimeter (KE) und für die Punktmessungen Regensimulatoren (RS) installiert. Diese Installationen sind auf beiden Teilflächen weitgehend gleich bezüglich ihrer Eigenschaften, unterschieden sich jedoch teilweise in ihrer Anzahl mit mehr Installationen auf der Schlagfläche als auf der Waldfläche.

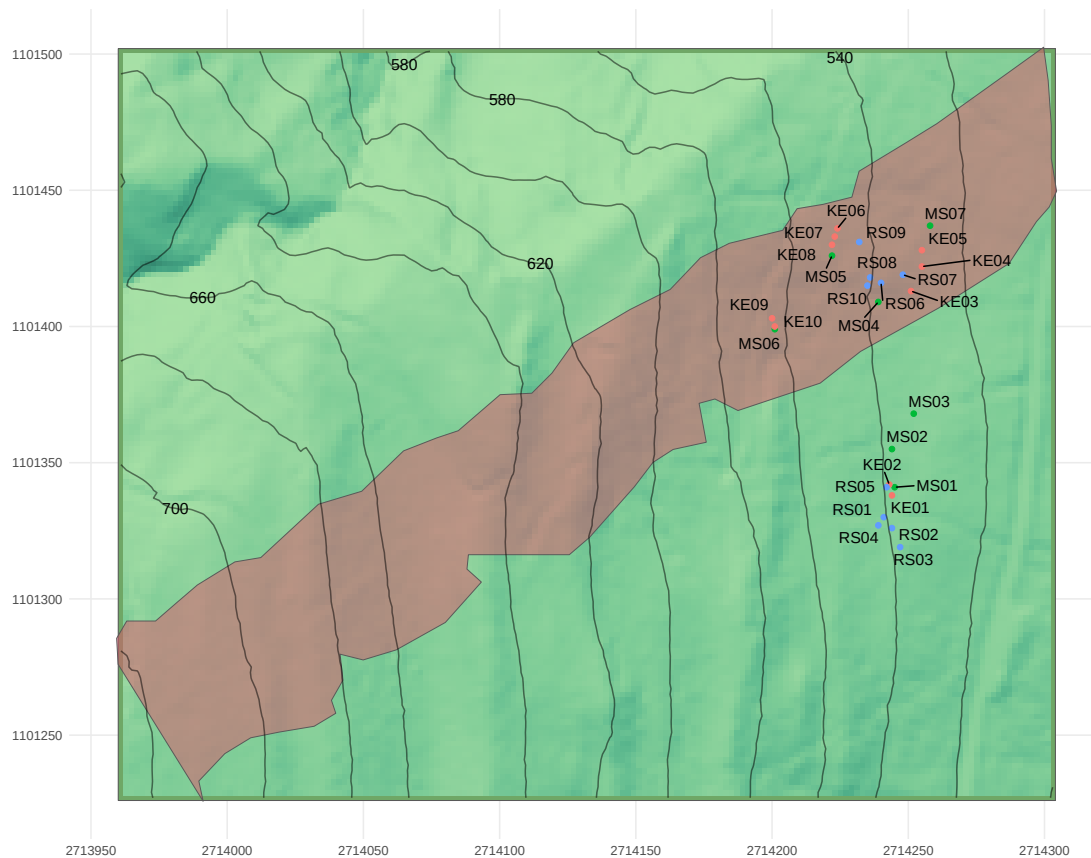


Abbildung 2: Karte zum Untersuchungsgebiet mit den Installationen auf der Waldfläche (grün) und auf der Schlagfläche (braun) mit Angabe der Höhe über Meer (SWISSALTI3D) referenziert auf die Koordinaten der Landesvermessung (EPSG:2056).

Die Installationen befinden sich im unteren Hangbereich der Schlagfläche beziehungsweise der benachbarten Waldfläche. Die Installationen in den beiden Teilflächen sind nicht mehr als 100 m voneinander entfernt und die Eigenschaften abgesehen von der Vegetation ähnlich. Dadurch kann angenommen werden, dass allfällige Unterschiede in den gemessenen Daten hauptsächlich auf die unterschiedliche Vegetation zurückgeführt werden können.

2.2 Messstationen

2.2.1 Aufbau

Die Messstationen dienen der Aufzeichnung von Zeitreihen zur Regeninterzeption und zum Bodenwasser. Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet 7 Messstationen installiert, 3 auf der Waldfläche und 4 auf der Schlagfläche. Dabei gibt es Messstationen für den Bereich Regen, welche die Regenhöhe messen sowie für den Bereich Boden, welche den Wassergehalt und die Saugspannung messen.

Tabelle 2: Übersicht zu den Messstationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.

Messstation	Ostkoordinate (m)	Nordkoordinate (m)	Teilfläche	Messbereich
MS01	2714245	1101341	Waldfläche	Regen
MS02	2714244	1101355	Waldfläche	Boden
MS03	2714252	1101368	Waldfläche	Boden
MS04	2714239	1101409	Schlagfläche	Regen
MS05	2714222	1101426	Schlagfläche	Regen
MS06	2714201	1101399	Schlagfläche	Boden
MS07	2714258	1101437	Schlagfläche	Boden

Die Messstationen für den Messbereich Regen sind Pluviometer, welche oberhalb der Bodenoberfläche auf einem Baumstumpf installiert sind. Die Messstationen für den Messbereich Boden sind Hygrometer und Tensiometer, welche unterhalb der Bodenoberfläche in einem hinterfüllten Profil vergraben sind. Im Detail unterscheiden sich die Messstationen weiterhin in den Sensortypen, die Installationstiefen und die Zeitspannen.

Tabelle 3: Details zu den Messstationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.

Messstation	Messgrösse	Sensortyp	Installationstiefe	Zeitspanne
MS01	Regenhöhe	Rainwise RAINEW	-1 m	April 2019 - Dezember 2021
MS02	Wassergehalt	Decagon 10HS	0.15 m, 0.3 m, 0.5 m, 1 m	April 2019 - Juni 2020
MS02	Saugspannung	Decagon T4	0.3 m, 0.5 m, 1 m	April 2019 - Juni 2020
MS03	Wassergehalt	Meter TEROS11	0.3 m, 0.5 m, 1 m	November 2020 - Dezember 2021
MS03	Saugspannung	Meter TEROS32	0.3 m, 0.5 m, 1 m	November 2020 - Dezember 2021
MS04	Regenhöhe	Rainwise RAINEW	-1 m	April 2019 - Dezember 2021
MS05	Regenhöhe	Rainwise RAINEW	-1 m	April 2019 - Dezember 2021
MS06	Wassergehalt	Decagon 10HS	0.15 m, 0.3 m, 0.5 m, 1 m	Juni 2020 - Dezember 2021
MS06	Saugspannung	Decagon T4	0.3 m, 0.5 m, 1 m	Juni 2020 - Dezember 2021
MS07	Wassergehalt	Meter TEROS11	0.3 m, 0.5 m, 1 m	November 2020 - Dezember 2021
MS07	Saugspannung	Meter TEROS32	0.3 m, 0.5 m, 1 m	November 2020 - Dezember 2021

Alle Messstationen erheben die Daten auf einer kleinen Fläche beziehungsweise in einem kleinen Volumen mit einer Kantenlänge in der Grössenordnung von 0.1 m und damit näherungsweise an einem Punkt. Für die Auswertungen wird deshalb angenommen, dass diese Daten von einem Punkt für die gesamten Teilflächen repräsentativ sind. Teilweise kann die mögliche Variabilität innerhalb der Teilflächen durch mehrere vergleichbare Messungen berücksichtigt werden, jedoch sind solche Vergleiche aufgrund der geringen Anzahl beschränkt.

2.2.2 Auswertung

Die wichtigsten Messgrössen aus den Messstationen für die hydrologische Auswertung sind die Regenhöhe h (m) und der Wassergehalt m (-). Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung werden alle

Messgrössen aus den Messstationen auf die Auflösung eines Tag normiert. Für die Regenhöhe werden dafür alle Messpunkte eines Tages summiert, während für den Wassergehalt und die Saugspannung der Wert am Ende der summierten Regenhöhe ausgewählt wird. Weiterhin wird aufgrund der aufeinander folgenden Tagen mit einer gemessenen Regenhöhe grösser als einem Grenzwert von 0.01 m jeweils eine Regenereignis mit einer Ereignisdauer d (h) definiert.

Das Regeninkrement j (m) für die Quantifizierung der Regeninterzeption wird als Differenz der Regenhöhe zwischen 2 Messstationen für die gleiche Zeitspanne definiert. Mit den 3 Messstationen ergibt dies 6 Kombinationen, wobei sich diese durch die Beschränkung auf positive Werte der Regeninterzeption auf 3 Kombinationen verringern. Die Kombination auf der Schlagfläche dient dabei als Kontrolle für die beiden Kombinationen zwischen Waldfläche und Schlagfläche.

Für die statistische Auswertung der Regeninterzeption wird angenommen, dass das Regeninkrement eine Funktion der Regenhöhe und der Ereignisdauer ist. Die Teilfläche wird als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(j) = j_0 + j_1 * \ln(h) + j_2 * \ln(d) \quad (1)$$

Das Feuchtigkeitsinkrement b (-) für die Quantifizierung des Bodenwassers wird als Differenz zwischen der Nachfeuchtigkeit f (-) und der Vorfeuchtigkeit i (-) über ein Regenereignis definiert. Dafür wird der Durchschnitt des Wassergehalts über die berücksichtigte Bodentiefe berechnet. Über die Bodentiefe lässt sich damit auch eine Wasserhöhe berechnen, welche mit der Regenhöhe und der Abflusshöhe vergleichbar ist.

Für die statistische Auswertung des Bodenwassers wird angenommen, dass das Feuchtigkeitsinkrement eine Funktion der Sukzessionszeit, der Vorfeuchtigkeit, der Regenhöhe und der Ereignisdauer ist. Die Teilfläche wird als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(b) = b_0 + b_1 * t + b_2 * i + b_3 * \ln(h) + b_4 * \ln(d) \quad (2)$$

Während das Regeninkrement sowohl auf der Bezugsebene des Regenereignisses wie auch des Kalenderjahres ausgewertet wird, ist für das Feuchtigkeitsinkrement nur eine Auswertung auf der Bezugsebene des Regenereignisses sinnvoll. In diesem Zusammenhang ist das Feuchtigkeitsinkrement ein Mass für das Bodenwasser, das kurzfristig zwischengespeichert werden kann

2.3 Kastenerosimeter

2.3.1 Aufbau

Die Kastenerosimeter dienen der Aufzeichnung von Zeitreihen zum Oberflächenabfluss, zur Oberflächenerosion, zur Bodenauswaschung und zur Bodenbedeckung. Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet 10

Kastenerosimeter installiert, 2 auf der Waldfläche und 8 auf der Schlagfläche. Weiterhin unterschieden sich die Kastenerosimeter in der Behandlung, wobei 2 gemulcht und 8 belassen sind.

Tabelle 4: Übersicht zu den Kastenerosimeter im Untersuchungsgebiet von Bedano.

Kastenerosime	Ostkoordinate (m)	Nordkoordinat (m)	Teilfläche	Behandlung	Hangneigung (°)
KE01	2714244	1101338	Waldfläche	belassen	33
KE02	2714243	1101342	Waldfläche	belassen	34
KE03	2714251	1101413	Schlagfläche	belassen	32
KE04	2714255	1101422	Schlagfläche	gemulcht	31
KE05	2714255	1101428	Schlagfläche	belassen	37
KE06	2714224	1101436	Schlagfläche	gemulcht	34
KE07	2714223	1101433	Schlagfläche	belassen	38
KE08	2714222	1101430	Schlagfläche	belassen	39
KE09	2714200	1101403	Schlagfläche	belassen	40
KE10	2714201	1101400	Schlagfläche	belassen	41

Ein Kastenerosimeter ist ein rechteckiger Rahmen mit 1.5 m Breite und 5 m Länge, welcher 0.05 m in den Boden eingeschlagen ist. Dadurch ergibt sich eine Messfläche von 7.5 m², an deren unteren Ende sich eine Sammeleinrichtung für Wasser und Feststoffe befindet. Nach jedem Regenereignis gemäss dem festgelegten Grenzwert für die Regenhöhe werden die Sammeleinrichtungen geleert und die Menge an gesammeltem Wasser und Feststoff gemessen. Für einige ausgewählte Zeitpunkte werden weiterhin Proben des Wassers genommen für die Messung von Stoffkonzentrationen im Labor und die Bodenbedeckung auf der Messfläche der Kastenerosimeter wird bestimmt.

2.3.2 Auswertung

Die wichtigsten Messgrössen aus den Kastenerosimeter für die hydrologische Auswertung sind die Abflusshöhe r (m) und die Erosionsmasse e (kg/m²). Weiterhin werden als zusätzliche Messgrössen die Stoffkonzentrationen c von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie die Deckungsgrade u (-) der Streu und der Vegetation erhoben. Die Erhebung der Daten erfolgt immer für jedes Kastenerosimeter nach dem definierten Regenereignis.

Für die statistische Auswertung des Oberflächenabflusses wird angenommen, dass die Abflusshöhe eine Funktion der Hangneigung, der Sukzessionszeit, der Regenhöhe und der Ereignisdauer ist, wobei die Teilfläche und die Behandlung als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt wird.

$$\ln(r) = r_0 + r_1 * s + r_2 * t + r_3 * \ln(h) + r_4 * \ln(d) \quad (3)$$

Für die statistische Auswertung der Oberflächenerosion wird angenommen, dass die Erosionsmasse eine Funktion der Hangneigung, der Sukzessionszeit, der Abflusshöhe und der Ereignisdauer ist. Die Teilfläche und die Behandlung werden als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(e) = e_0 + e_1 * s + e_2 * t + e_3 * \ln(r) + e_4 * \ln(d) \quad (4)$$

Für die statistische Auswertung der Bodenauswaschung wird angenommen, dass die Stoffkonzentrationen eine Funktion der Sukzessionszeit und der Abflusshöhe sind. Die Teilfläche und die Behandlung werden als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(c) = c_0 + c_1 * t + c_2 * \ln(r) \quad (5)$$

Für die statistische Auswertung der Bodenbedeckung wird angenommen, dass die Deckungsgrade eine Funktion der Hangneigung und der Sukzessionszeit sind. Die Teilfläche und die Behandlung werden als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(u) = u_0 + u_1 * s + u_2 * t \quad (6)$$

Während die Abflusshöhe und die Erosionsmasse sowohl auf der Bezugsebene des Regenereignisses wie auch des Kalenderjahres ausgewertet werden, ist für die Stoffkonzentrationen und die Deckungsgrade nur eine Auswertung auf der Bezugsebene des Regenereignisses sinnvoll. Weiterhin gibt es für die Deckungsgrade nur Messpunkte für ausgewählte Regenereignisse und für die Stoffkonzentrationen sogar nur für ausgewählte Kastenerosimeter.

Die Modelle für die Abflusshöhe werden zusätzlich für die Aufskalierung der Prozesse im Teileinzugsgebiet verwendet. Dafür wird die jährliche Regenhöhe mit 2000 mm angesetzt und mit der Messfläche der Kastenerosimeter und der Einzugsfläche der Rasterzelle normiert. Die daraus berechnete Abflusshöhe wird für die Berechnung der Erosionsmasse verwendet. Mit diesem Ansatz können der Oberflächenabfluss und die Oberflächenerosion räumlich und zeitlich aufskaliert werden.

2.4 Regensimulator

2.4.1 Aufbau

Die Regensimulatoren dienen der Aufzeichnung von Messpunkten zum Oberflächenabfluss, zur Oberflächenerosion und zum Bodenwasser. Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet 10 Regensimulationen durchgeführt worden, 5 auf der Waldfläche und 5 auf der Schlagfläche. Die Regensimulationen wurden

in Sommer 2021 durchgeführt und demnach 2 Jahre nach den Holzschlag. Dabei wurden die Regensimulatoren in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Kastenerosimeter installiert worden, damit die Standorte möglichst vergleichbar sind.

Tabelle 5: Übersicht zu den Regensimulationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.

Regensimulator	Ostkoordinate (m)	Nordkoordinate (m)	Vegetation	Hangneigung (°)
RS01	2714241	1101330	Bestand	39
RS02	2714244	1101326	Bestand	33
RS03	2714247	1101319	Bestand	38
RS04	2714239	1101327	Bestand	40
RS05	2714242	1101341	Bestand	37
RS06	2714240	1101416	Lücke	37
RS07	2714248	1101419	Lücke	33
RS08	2714236	1101418	Lücke	41
RS09	2714232	1101431	Lücke	31
RS10	2714235	1101415	Lücke	34

Ein Regensimulator besteht aus einem quadratischen Gerüst, an dem in einer Höhe von ungefähr 1 m eine Platte mit Kapillaren angebracht ist. Diese Platte ist beweglich und deckt so einen Bereich über eine Länge und eine Breite von jeweils 1 m ab. Die Kapillare werden durch eine Pumpe mit Wasser gespiesen und simulieren damit ein Regenereignis. Am unteren Ende der Messfläche von 1 m² wird ein Bodenprofil ausgehoben, in dem sich in 0.05 m Tiefe eine Sammeleinrichtung für den Oberflächenabfluss und die Oberflächenenerosion befindet. Darunter anschliessend sind im Bodenprofil paarweise Hygrometer in Tiefen von 0.15 m, 0.3 m und 0.5 m installiert. Für jede Regensimulation werden zwei Versuche im Abstand von 2 h durchgeführt mit jeweils einer Regenhöhe von 0.1 m über eine Ereignisdauer von 1 h.

2.4.2 Auswertung

Die wichtigsten Messgrössen aus den Regensimulatoren für die hydrologische Auswertung sind die Abflusshöhe, die Erosionsmasse und der Wassergehalt. Die Regenhöhe und die Ereignisdauer sind für alle Versuche konstant und werden deshalb nicht explizit in der Auswertung berücksichtigt.

Für die statistische Auswertung des Oberflächenabflusses wird angenommen, dass die Abflusshöhe eine Funktion der Hangneigung und der Vorfeuchtigkeit ist. Die Teilfläche wird als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(r) = r_0 + r_1 * s + r_2 * i \quad (7)$$

Für die statistische Auswertung der Oberflächenerosion wird angenommen, dass die Erosionsmasse eine Funktion der Hangneigung und der Abflusshöhe ist. Die Teilfläche wird als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(e) = e_0 + e_1 * s + e_2 * \ln(r) \quad (8)$$

Für die statistische Auswertung des Bodenwassers wird angenommen, dass das Feuchtigkeitsinkrement eine Funktion der Hangneigung und der Vorfeuchtigkeit ist. Die Teilfläche wird als Faktor mit einer Interaktion in allen Koeffizienten berücksichtigt.

$$\ln(b) = b_0 + b_1 * s + b_2 * i \quad (9)$$

Die Erhebungen mit den Regensimulatoren sind teilweise vergleichbar mit denen der Messstationen und der Kastenerosimeter, allerdings als Punktmessungen und nicht als Zeitreihen. Dafür sind die Bedingungen besser kontrolliert und es wird eine stichprobenartige Überprüfung der Zeitreihen ermöglicht.

2.5 Drohnenbilder

2.5.1 Durchführung

Mit den Drohnenbilder wird eine Zeitreihe zur Oberflächenerosion und zur Bodenbedeckung über die gesamte Schlagfläche erstellt. Insgesamt werden 3 Drohnenbilder erstellt, welche einen grossen Teil der Schlagfläche wie auch der benachbarten Waldfläche abdecken.

Tabelle 6: Übersicht zu den Drohnenbilder im Untersuchungsgebiet von Bedano.

Drohnenbild	Sensortyp	Auflösung	Aufnahmedatum
DB01	DJI Phantom 4	0.03 m	Juni 2019
DB02	DJI M300 RTK	0.01 m	März 2022
DB03	DJI M300 RTK	0.02 m	April 2023

Die Drohnenbilder enthalten Informationen über die Spektralbänder rot, grün und blau sowie über die Höhenlage der Oberfläche. Mit der Definition von Referenzpunkten im Gelände werden diese Drohnenbilder bezüglich ihrer Lage angeglichen, wobei das Drohnenbild vom April 2023 als Referenzbild verwendet

wurde. Daraus können ein Orthomosaik sowie ein Oberflächenmodell berechnet werden. Deren Auflösung wird auf einen Wert von 0.5 m vereinheitlicht.

2.5.2 Auswertung

Die grundlegenden Messgrössen aus den Drohnenbildern sind die Spektralbänder und die Höhenlage. Daraus können jeweils die Differenzen in der Oberfläche unter Berücksichtigung der Vegetation zwischen zwei Drohnenbildern berechnet werden. Diese ermöglichen zusätzliche Flächenerhebung auf der Schlagfläche zum Oberflächenabfluss und zur Bodenbedeckung mit einer Abschätzung des jährlichen Erosionsvolumens und des jährlichen Vegetationszuwachses.

Eine Voraussetzung für diese Auswertung ist die Identifizierung der Vegetation auf der Grundlage der Spektralbänder. Dafür wird ein visible-band difference vegetation index (VDVI) für alle Rasterzelle berechnet. Jede Rasterzelle mit einem Wert grösser als 0 wird als Vegetation interpretiert, wobei diese jeweils für zwei Drohnenbilder kombiniert werden.

Darauf aufbauend werden die Differenzen in der Höhenlage zwischen zwei Drohnenbildern berechnet. Dabei wird eine negative Differenz für alle nicht als Vegetation interpretierten Rasterzellen als Erosionsvolumen definiert. Komplementär dazu wird eine positive Differenz für alle als Vegetation interpretierten Rasterzellen als Vegetationszuwachs definiert. Diese Werte werden mit der Zeitspanne zwischen den zwei Bildern auf jährliche Werte normiert.

3 Resultate

3.1 Zeitreihen

3.1.1 Regeninterzeption

Die Grundlage für die Auswertung der Regeninterzeption sind die mit den 3 Messstationen erhobenen Daten zur Regenhöhe. Die Zeitreihen zeigen klare Unterschiede zwischen den Teilflächen aber auch über die Zeitspannen (Figur 3).

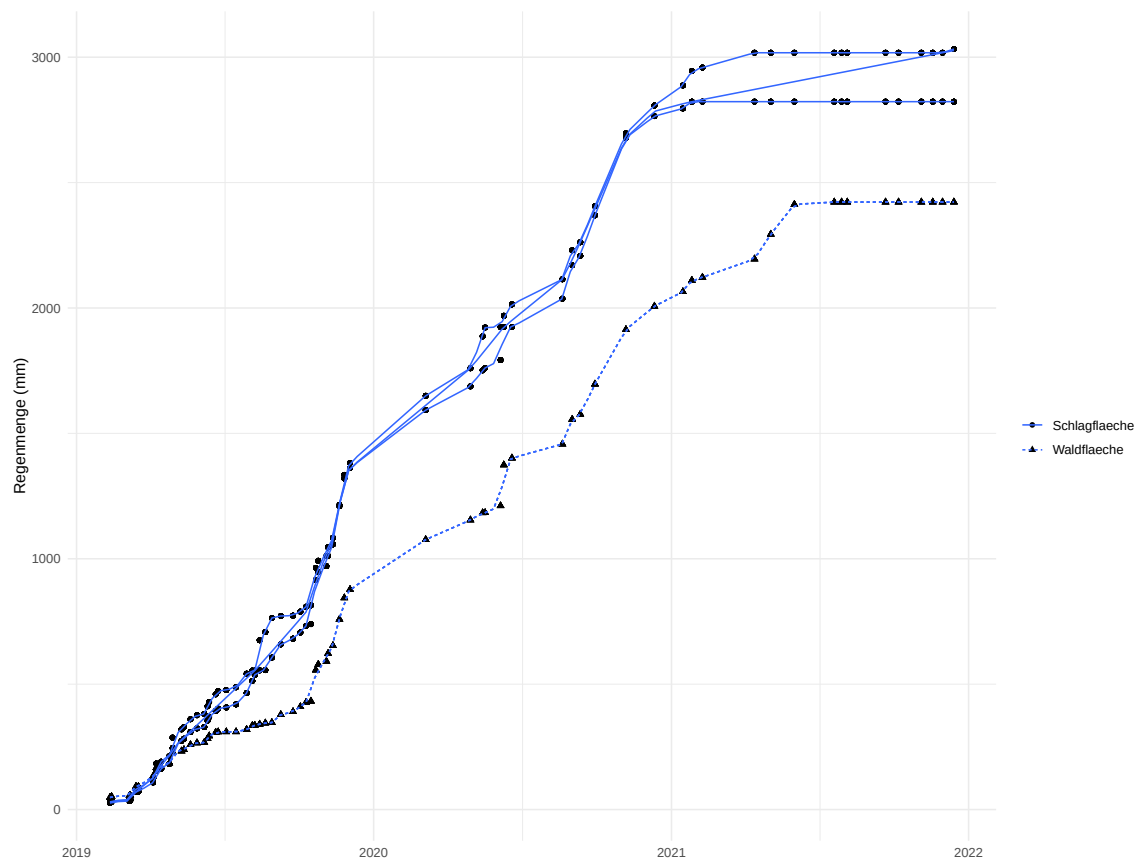


Abbildung 3: Messwerte der Regenhöhe aus den Messstationen kumuliert über jedes berücksichtigte Regenereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Regenhöhe für jede Teilfläche.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für das Regeninkrement auf die Bezugsebenen des Regenereignisses und des Kalenderjahres ist die Grundlage für die Quantifizierung der Regeninterzeption. Die Quantile zeigen, dass sich die Regeninterzeption auf der Waldfläche auf der Bezugsebene des Regenereignisses nur wenig von den Variabilitäten auf der Schlagfläche liegt, während sie auf der Bezugsebene des Kalenderjahres weit darüber liegt (Figur 4, Tabelle 7).

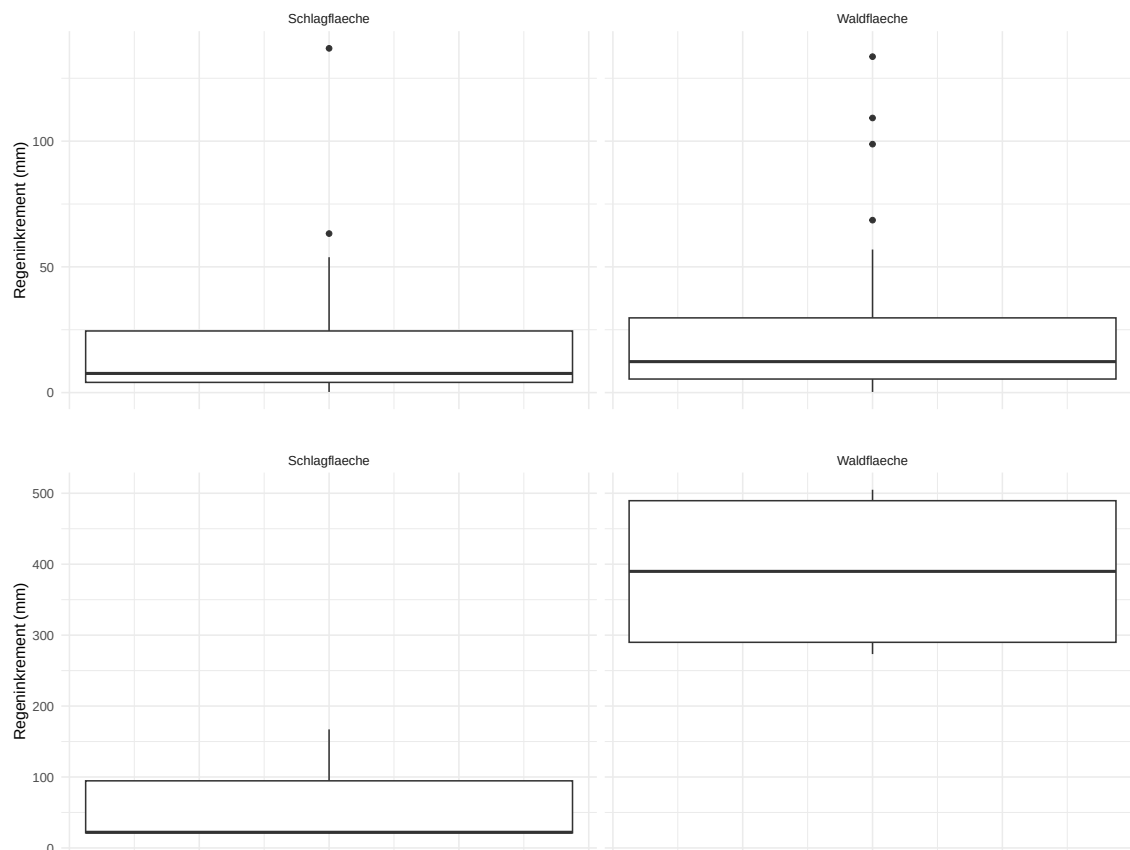


Abbildung 4: Messwerte des Regeninkrements zur Quantifizierung der Regeninterzeption aus den Messstationen für die Bezugsebene des Regenereignisses (oben) und des Kalenderjahres (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Regeninkrements.

Tabelle 7: Quantile der Regeninkremente gemessen mit den Messstationen zur Quantifizierung des Regeninterzeption.

Ebene	Standort	25 % Quantil (mm)	50 % Quantil (mm)	75 % Quantil (mm)
Regenereignis	Bestand	5.3975	12.3190	29.7180
Regenereignis	Lücke	4.064	7.620	24.511
Kalenderjahr	Bestand	289.8775	389.8900	489.5215
Kalenderjahr	Lücke	21.336	22.098	94.615

Mit der Varianzanalyse zur Regeninterzeption werden die signifikanten Einflussvariablen für das Regeninkrement als Zielvariable bestimmt (Tabelle 8). Demnach sind sowohl der Standort wie auch die Regenhöhe signifikant auf beiden Bezugsebenen, nicht jedoch die Ereignisdauer.

Tabelle 8: Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Regeninterzeption mit $\ln(\text{Regeninkrement})$ aus den Messstationen als Zielvariable.

Ebene	Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Regenereignis	Standort	9.94	0.02029	0.004
Regenereignis	$\ln(\text{Regenhöhe})$	340.96	0.69615	0.001
Regenereignis	$\ln(\text{Regendauer})$	0.06	0.00013	0.816
Regenereignis	Standort: $\ln(\text{Regenhöhe})$	4.64	0.00947	0.031
Regenereignis	Standort: $\ln(\text{Regendauer})$	1.18	0.00241	0.274
Kalenderjahr	Standort	245.687	0.72189	0.007
Kalenderjahr	$\ln(\text{Regenhöhe})$	86.129	0.25307	0.015
Kalenderjahr	Standort: $\ln(\text{Regenhöhe})$	5.523	0.01623	0.148

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Regeninterzeption wird ein gemischtes Modell zur Regeninterzeption für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 9). Tendenziell ist das Regeninkrement auf der Waldfläche grösser als auf der Schlagfläche. Auf der Bezugsebene des Regenereignisses nimmt das Regeninkrement mit zunehmender Regenhöhe zu, während das Regeninkrement auf der Bezugsebene des Kalenderjahres mit zunehmender Regenhöhe abnimmt.

Tabelle 9: Regression (LMER) der Regeninterzeption mit $\ln(\text{Regeninkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.

Bezugsebene	Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Regenereignis	Standort	0.01025	0.1012	-	-	-
Regenereignis	(Waldfläche)	-	-	0.52606	0.18944	2.777
Regenereignis	(Schlagfläche)	-	-	-1.67173	0.22390	-7.466
Regenereignis	$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	0.97355	0.05328	18.273
Kalenderjahr	Standort	1.14669	1.0708	-	-	-
Kalenderjahr	(Waldfläche)	-	-	2.8616	1.5317	1.868
Kalenderjahr	(Schlagfläche)	-	-	-3.4682	1.0829	-3.203
Kalenderjahr	$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	-1.1306	0.1778	-6.358

3.1.2 Oberflächenabfluss

Die Grundlage für die Auswertung des Oberflächenabflusses sind die mit den 10 Kastenerosimeter erhobenen Daten zur Abflusshöhe. Die Zeitreihen zeigen klare Unterschiede zwischen den Teilflächen und über die Zeitspannen, nicht jedoch zwischen der Behandlung (Figur 5).

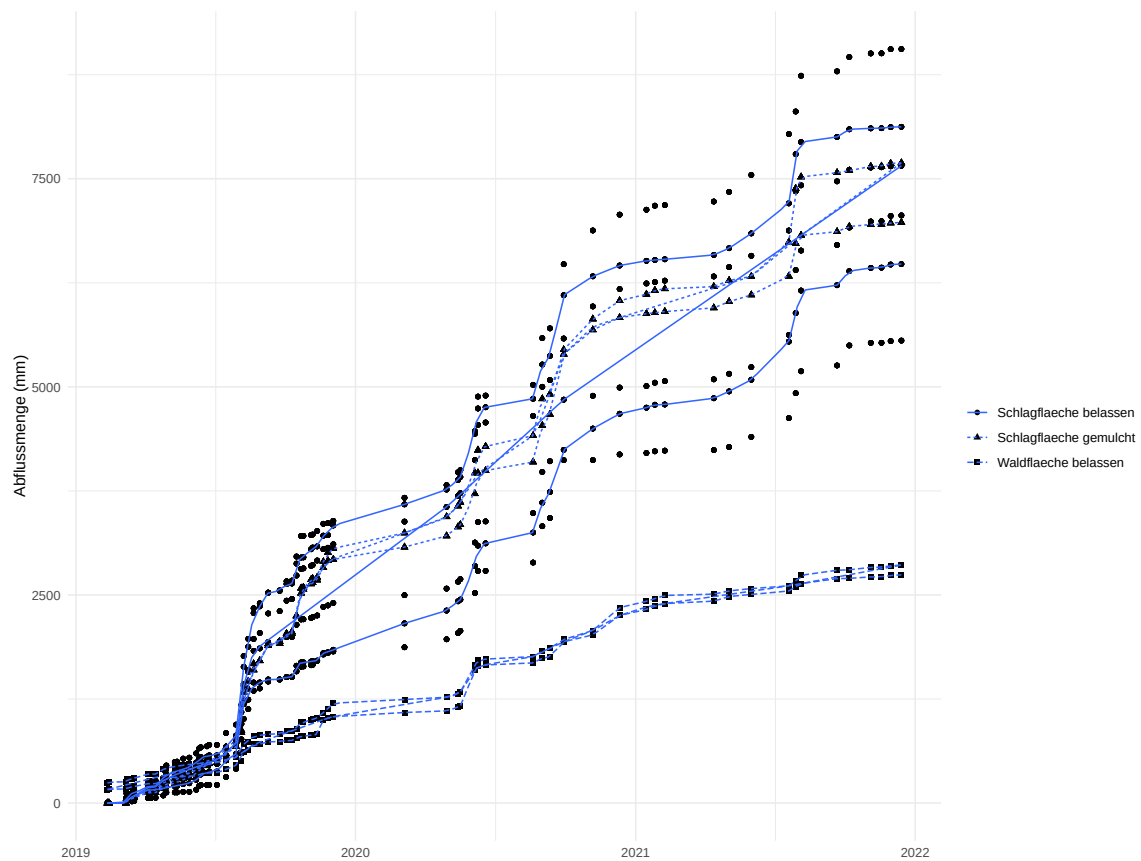


Abbildung 5: Messwerte des Oberflächenabflusses aus den Kastenerosimeter kumuliert über jedes berücksichtigte Ereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Abflusshöhe für jede Teilfläche und Behandlung.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Abflusshöhen auf die Bezugsebenen des Regenereignisses und des Kalenderjahres ist die Grundlage für die Quantifizierung des Oberflächenabflusses. Die Quantile zeigen, dass sich die Abflusshöhe auf der Waldfäche für beide Bezugsebenen deutlich von der Schlagfläche unterscheidet und dass die Tendenz über die Zeitspanne zwischen den Bezugsebenen unterschiedlich ist (Figur 6, Tabelle 10, Tabelle 11).

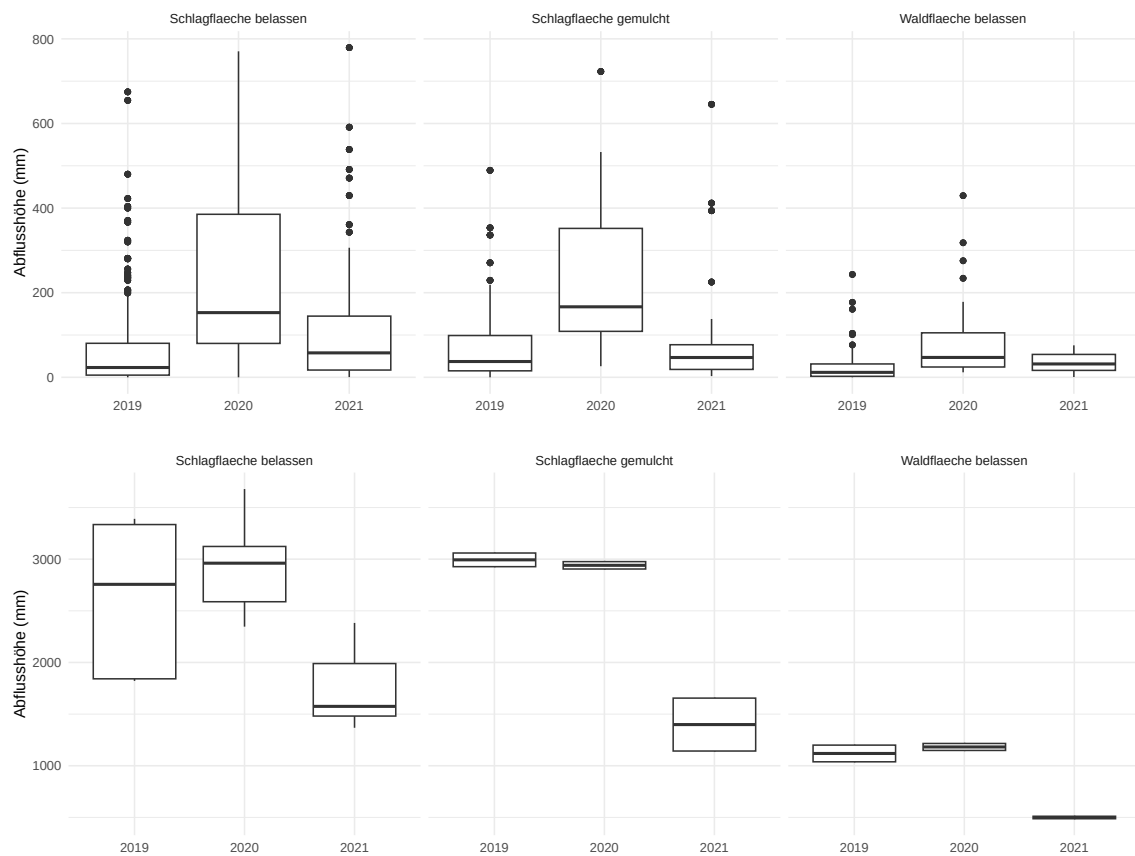


Abbildung 6: Messwerte der Abflusshöhe zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses aus den Kastenrosimeter für die Ebene des Regenereignisses (oben) und des Kalenderjahres (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Abflusshöhe.

Tabelle 10: Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses auf der Bezugsebene des Regenereignisses.

Standort	Jahr	25 % Quantil (mm)	50 % Quantil (mm)	75 % Quantil (mm)
Waldfläche belassen	2019	3.3600000	13.9333333	34.4333333
Waldfläche belassen	2020	24.40000	47.00000	105.20000
Waldfläche belassen	2021	16.4000000	31.6000000	54.1333333
Schlagfläche belassen	2019	10.2666667	34.6666667	98.6666667
Schlagfläche belassen	2020	82.6666667	153.8666667	385.3333333
Schlagfläche belassen	2021	17.2000000	57.8000000	144.6666667
Schlagfläche gemulcht	2019	18.6666667	44.6666667	111.4666667
Schlagfläche gemulcht	2020	108.66667	166.66667	352.00000
Schlagfläche gemulcht	2021	18.666667	46.866667	77.066667

Tabelle 11: Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.

Standort	Jahr	25 % Quantil (mm)	50 % Quantil (mm)	75 % Quantil (mm)
Waldfläche belassen	2019	1038.227	1119.047	1199.867
Waldfläche belassen	2020	1148.267	1182.067	1215.867
Waldfläche belassen	2021	487.4000	499.1667	510.9333
Schlagfläche belassen	2019	1841.600	2756.133	3335.000
Schlagfläche belassen	2020	2587.733	2961.000	3122.800
Schlagfläche belassen	2021	1481.067	1574.933	1989.333
Schlagfläche gemulcht	2019	2927.267	2993.400	3059.533
Schlagfläche gemulcht	2020	2904.667	2940.400	2976.133
Schlagfläche gemulcht	2021	1142.533	1398.733	1654.933

Mit der Varianzanalyse zum Oberflächenabfluss werden die signifikanten Einflussvariablen für die Abflusshöhe als Zielvariable bestimmt (Tabelle 12). Demnach sind sowohl der Standort, die Sukzessionszeit und die Regenhöhe signifikant auf beiden Bezugsebenen, nicht jedoch die Ereignisdauer. Die Hangneigung ist nur auf der Bezugsebene des Kalenderjahres signifikant, nicht jedoch auf der Bezugsebene des Regenereignisses.

Tabelle 12: Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.

Bezugsebene	Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Regenereignis	Standort	18.360	0.03617	0.001
Regenereignis	Hangneigung	0.763	0.00075	0.380
Regenereignis	Sukzessionszeit	46.630	0.04593	0.001
Regenereignis	$\ln(\text{Regenhöhe})$	18.418	0.01814	0.001
Regenereignis	$\ln(\text{Regendauer})$	3.437	0.00339	0.053
Regenereignis	Standort:Hangneigung	0.459	0.00090	0.618
Regenereignis	Standort:Sukzessionszeit	1.058	0.00209	0.347
Regenereignis	Standort: $\ln(\text{Regenhöhe})$	2.124	0.00418	0.099
Regenereignis	Standort: $\ln(\text{Regendauer})$	0.459	0.00091	0.618
Kalenderjahr	Standort	59.826	0.45725	0.001
Kalenderjahr	Hangneigung	5.213	0.01992	0.038
Kalenderjahr	Sukzessionszeit	60.563	0.23144	0.001
Kalenderjahr	$\ln(\text{Regenhöhe})$	17.574	0.06716	0.001
Kalenderjahr	Standort:Hangneigung	0.294	0.00225	0.761
Kalenderjahr	Standort:Sukzessionszeit	6.257	0.04782	0.008
Kalenderjahr	Standort: $\ln(\text{Regenhöhe})$	1.787	0.01366	0.186

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Abflusshöhe wird ein gemischtes Modell zum Oberflächenabfluss für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 13, Tabelle 14). Tendenziell ist die Abflusshöhe auf der Schlagfläche grösser als auf der Waldfläche und nimmt mit zunehmender Regenhöhe zu. Auf der Schlagfläche nimmt die Abflusshöhe mit zunehmender Sukzessionszeit ab, während diese Tendenz auf der Waldfläche nicht eindeutig ist.

Tabelle 13: Regression (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Regenereignisses.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort:Sukzes	1.466	1.211	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	-1.21312	1.57601	-0.770
(Schlagfläche belassen)	-	-	-2.80305	1.11693	-2.510
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	0.29610	1.57133	0.188
(Waldfläche belassen):Sukzession:	-	-	0.75798	1.23469	0.614
(Schlagfläche belassen):Sukzession:	-	-	-0.17773	0.86423	-0.206
(Schlagfläche gemulcht):Sukzession:	-	-	-0.05834	1.23308	-0.047
$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	0.03908	0.03906	1.000

Tabelle 14: Regression (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort:Sukzes	0.07377	0.2716	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	-0.87900	0.37851	-2.322
(Schlagfläche belassen)	-	-	2.00000	0.45899	4.357
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	0.04031	0.36721	0.110
Hangneigung	-	-	-1.48373	0.57794	-2.567
(Waldfläche belassen):Sukzession:	-	-	-0.22980	0.29453	-0.780
(Schlagfläche belassen):Sukzession:	-	-	-0.15806	0.21110	-0.749
(Schlagfläche gemulcht):Sukzession:	-	-	-0.18218	0.28185	-0.646
$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	0.03908	0.06363	0.614

3.1.3 Oberflächenerosion

Die Grundlage für die Auswertung der Oberflächenerosion sind die mit den 10 Kastenerosimeter erhobenen Daten zur Erosionsmasse. Die Zeitreihen zeigen klare Unterschiede zwischen den Teilflächen, der Behandlung und über die Zeitspannen (Figur 7).

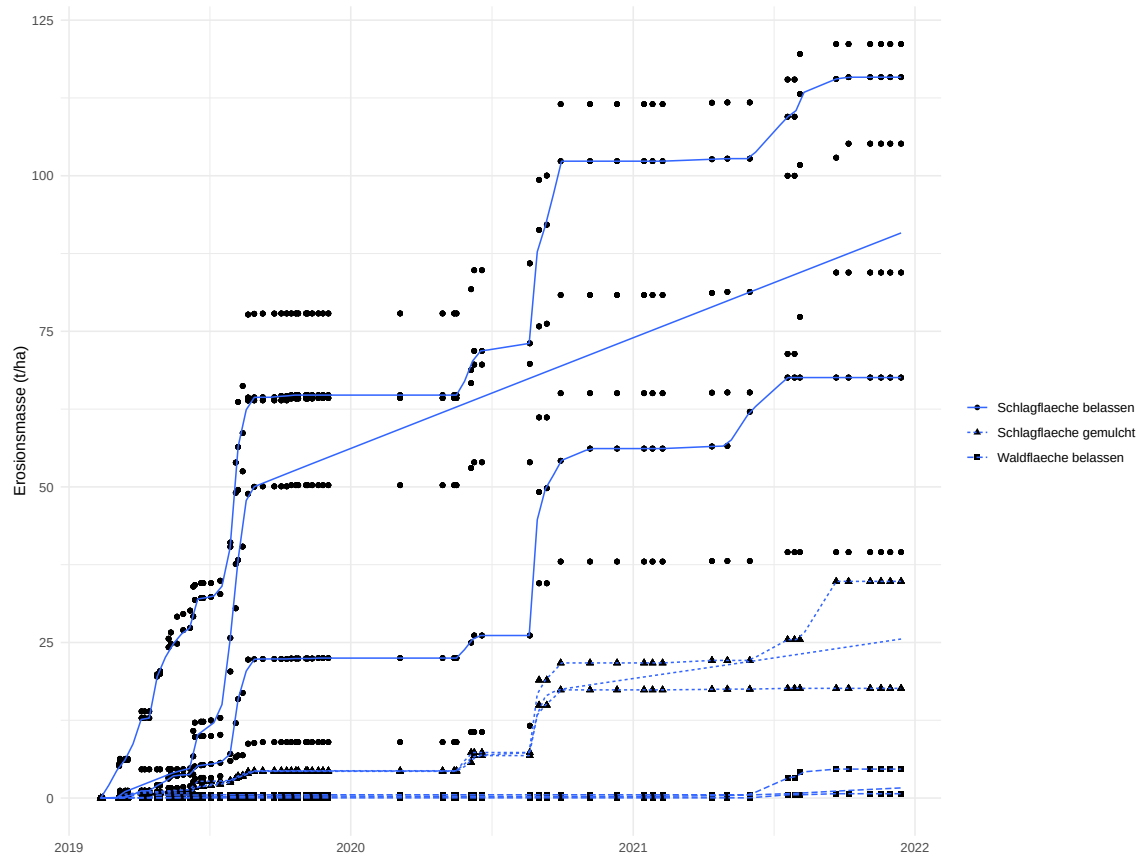


Abbildung 7: Messwerte der Oberflächenerosion aus den Kastenerosimeter kumuliert über jedes berücksichtigte Ereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Erosionsmasse für jede Teilfläche und Behandlung.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Erosionsmasse auf die Bezugsebenen des Regenereignisses und des Kalenderjahres ist die Grundlage für die Quantifizierung der Oberflächenerosion. Die Quantile zeigen, dass sich die Erosionsmasse auf der Waldfläche für beide Bezugsebenen deutlich von der Schlagfläche unterscheidet und dass die Tendenz über die Zeitspanne zwischen den Bezugsebenen unterschiedlich ist (Figur 8, Tabelle 15, Tabelle 16).

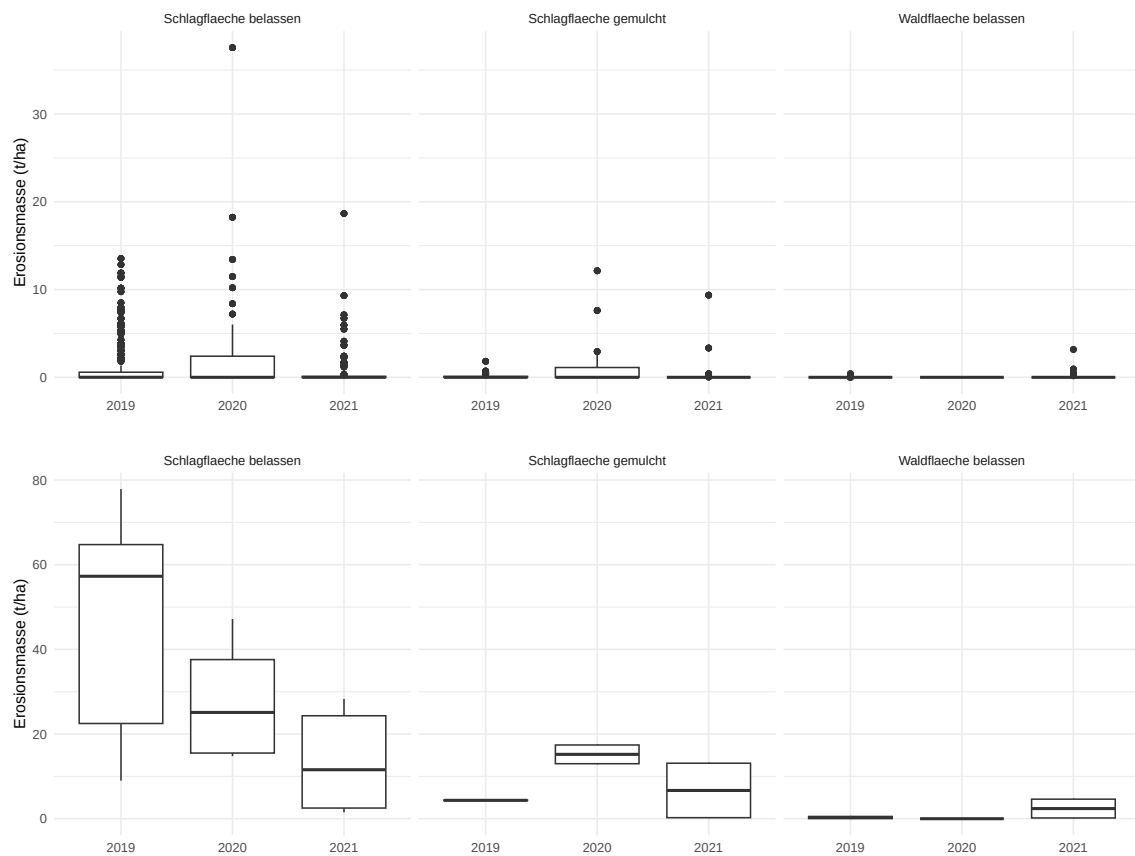


Abbildung 8: Messwerte der Erosionsmasse zur Quantifizierung der Oberflächenerosion aus den Kasten-erosimeter für die Ebene Ereignis (oben) und Jahr (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Erosionsmasse.

Tabelle 15: Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Oberflächenerosion auf der Bezugsebene des Regenereignisses.

Standort	Jahr	25 % Quantil (t/ha)	50 % Quantil (t/ha)	75 % Quantil (t/ha)
Waldfläche belassen	2019	0.006133333	0.023466667	0.076400000
Waldfläche belassen	2020	-	-	-
Waldfläche belassen	2021	0.4133333	0.7206667	1.5050000
Schlagfläche belassen	2019	0.1577333	0.5824000	3.4232000
Schlagfläche belassen	2020	1.131467	3.017600	4.963333
Schlagfläche belassen	2021	0.16000000	1.41600000	3.68133333
Schlagfläche gemulcht	2019	0.08706667	0.15986667	0.41640000
Schlagfläche gemulcht	2020	1.411200	2.746667	7.613333
Schlagfläche gemulcht	2021	0.08493333	0.26400000	3.33733333

Tabelle 16: Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Oberflächenerosion auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.

Standort	Jahr	25 % Quantil (t/ha)	50 % Quantil (t/ha)	75 % Quantil (t/ha)
Waldfläche belassen	2019	0.003706667	0.028286667	0.052866667
Waldfläche belassen	2020	-	-	-
Waldfläche belassen	2021	0.1733333	2.3953333	4.6173333
Schlagfläche belassen	2019	22.492933	57.268333	64.749867
Schlagfläche belassen	2020	15.50880	25.10387	37.58933
Schlagfläche belassen	2021	2.517867	11.573067	24.320667
Schlagfläche gemulcht	2019	4.297067	4.342933	4.388800
Schlagfläche gemulcht	2020	12.99400	15.20493	17.41587
Schlagfläche gemulcht	2021	0.2453333	6.6760000	13.1066667

Mit der Varianzanalyse zur Oberflächenerosion werden die signifikanten Einflussvariablen für die Erosionsmasse als Zielvariable bestimmt (Tabelle 17). Demnach sind sowohl der Standort, die Hangneigung, die Sukzessionszeit und die Abflusshöhe signifikant auf beiden Bezugsebenen, nicht jedoch die Ereignisdauer.

Tabelle 17: Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kas-
tenerosimeter als Zufallsvariable.

Ebene	Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Ereignis	Standort	20.990	0.08193	0.001
Ereignis	Hangneigung	18.726	0.03654	0.001
Ereignis	Sukzessionszeit	34.364	0.06706	0.001
Ereignis	$\ln(\text{Abflusshöhe})$	44.508	0.08686	0.001
Ereignis	$\ln(\text{Ereignisdauer})$	0.003	0.00001	0.965
Ereignis	Standort:Hangneigung	1.494	0.00583	0.235
Ereignis	Standort:Sukzession	6.552	0.02557	0.001
Ereignis	Standort: $\ln(\text{Abfluss})$	0.073	0.00029	0.920
Ereignis	Standort: $\ln(\text{Ereignisdauer})$	0.792	0.00309	0.446
Jahr	Standort	54.104	0.47025	0.001
Jahr	Hangneigung	0.417	0.00181	0.512
Jahr	Sukzessionszeit	14.650	0.06366	0.001
Jahr	$\ln(\text{Abflusshöhe})$	9.679	0.04206	0.003
Jahr	Standort:Hangneigung	4.196	0.03647	0.030
Jahr	Standort:Sukzession	11.643	0.10120	0.001
Jahr	Standort: $\ln(\text{Abfluss})$	12.737	0.11071	0.001

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Erosionsmasse wird ein gemischtes Modell zur Oberflächenerosion für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 18, Tabelle 19). Tendenziell ist die Erosionsmasse auf der Schlagfläche grösser als auf der Waldfläche und nimmt mit zunehmender Hangneigung und mit zunehmender Abflusshöhe zu. Auf der Schlagfläche ohne Behandlung nimmt die Erosionsmasse mit zunehmender Sukzessionszeit ab, während die Erosionsmasse auf der Schlagfläche mit Behandlung und auf der Waldfläche mit zunehmender Sukzessionszeit zunimmt.

Tabelle 18: Regression (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Regenereignisses.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort:Sukzes	2.017	1.420	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	-3.08125	2.04977	-1.503
(Schlagfläche belassen)	-	-	-6.25467	1.70777	-3.662
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	-0.58630	1.86595	-0.314
Hangneigung	-	-	7.57903	1.65773	4.572
(Waldfläche belassen):Sukzession:	-	-	2.98200	1.67560	1.780
(Schlagfläche belassen):Sukzession:	-	-	-0.53707	1.05116	-0.511
(Schlagfläche gemulcht):Sukzession:	-	-	0.82747	1.54624	0.535
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	-	-	0.31322	0.06079	5.152

Tabelle 19: Regression (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.1171	0.3422	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	-3.5835	1.1834	-3.028
(Schlagfläche belassen)	-	-	-1.8304	2.5521	-0.717
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	-1.9528	0.7426	-2.630
Hangneigung	-	-	1.5677	3.3301	0.471
(Waldfläche belassen): Sukzession:	-	-	2.1117	0.6574	3.212
(Schlagfläche belassen): Sukzession:	-	-	-0.3221	0.3489	-0.923
(Schlagfläche gemulcht): Sukzession:	-	-	0.7128	0.5501	1.296
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	-	-	2.1422	0.6989	3.065

3.1.4 Bodenwasser

Die Grundlage für die Auswertung des Bodenwassers sind die mit den 4 Messstationen erhobenen Daten zur Bodenfeuchtigkeit. Die Zeitreihen zeigen nur kleine Unterschiede zwischen den Teilflächen (Figur 9).

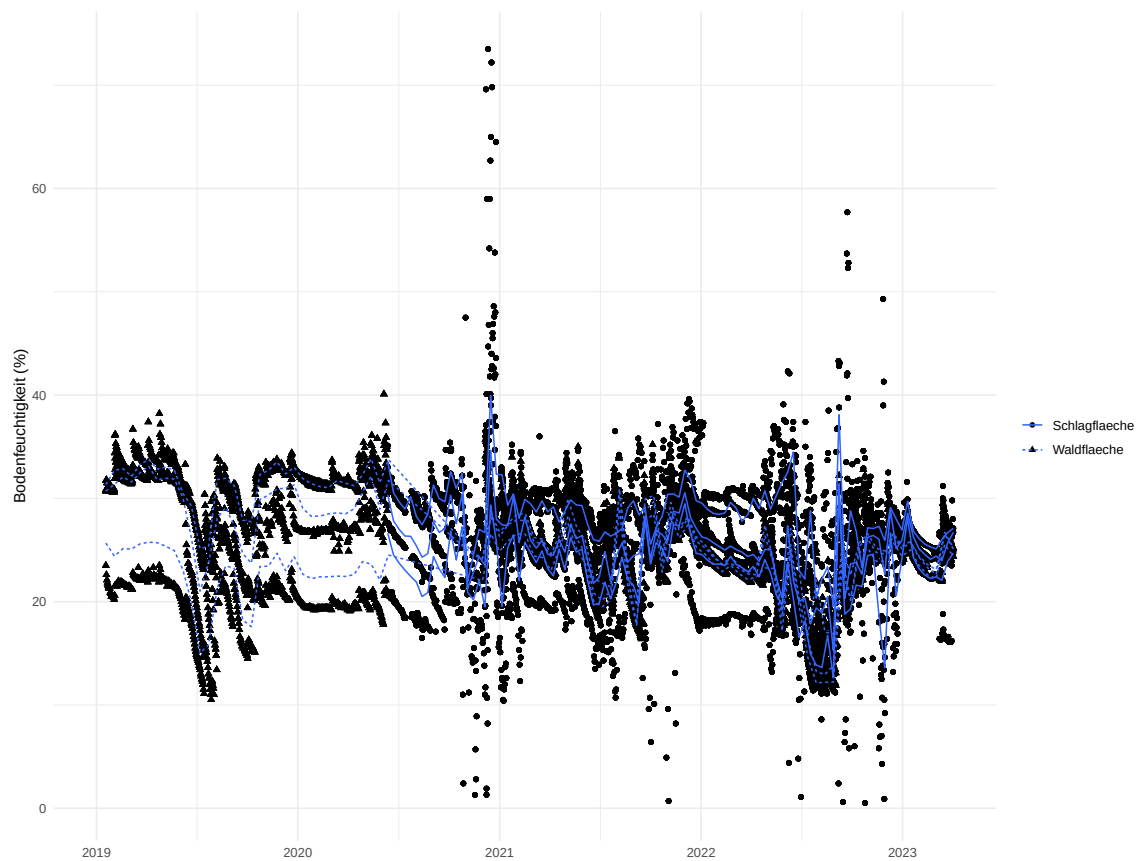


Abbildung 9: Messwerte der Bodenfeuchtigkeit zur Quantifizierung der Bodenwassers aus den Messstationen. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Bodenfeuchtigkeit für jede Teilfläche.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Feuchtigkeitsinkremente auf der Bezugsebenen des Regenerignisses über die Zeitspannen ist die Grundlage für die Quantifizierung des Bodenwassers. Die Quantile zeigen, dass sich die Feuchtigkeitsinkremente auf der Waldfläche nicht wesentlich von der Schlagfläche unterscheidet und dass die Tendenz über die Zeitspanne zwischen den Bezugsebenen ähnlich ist (Figur 10, Tabelle 20).

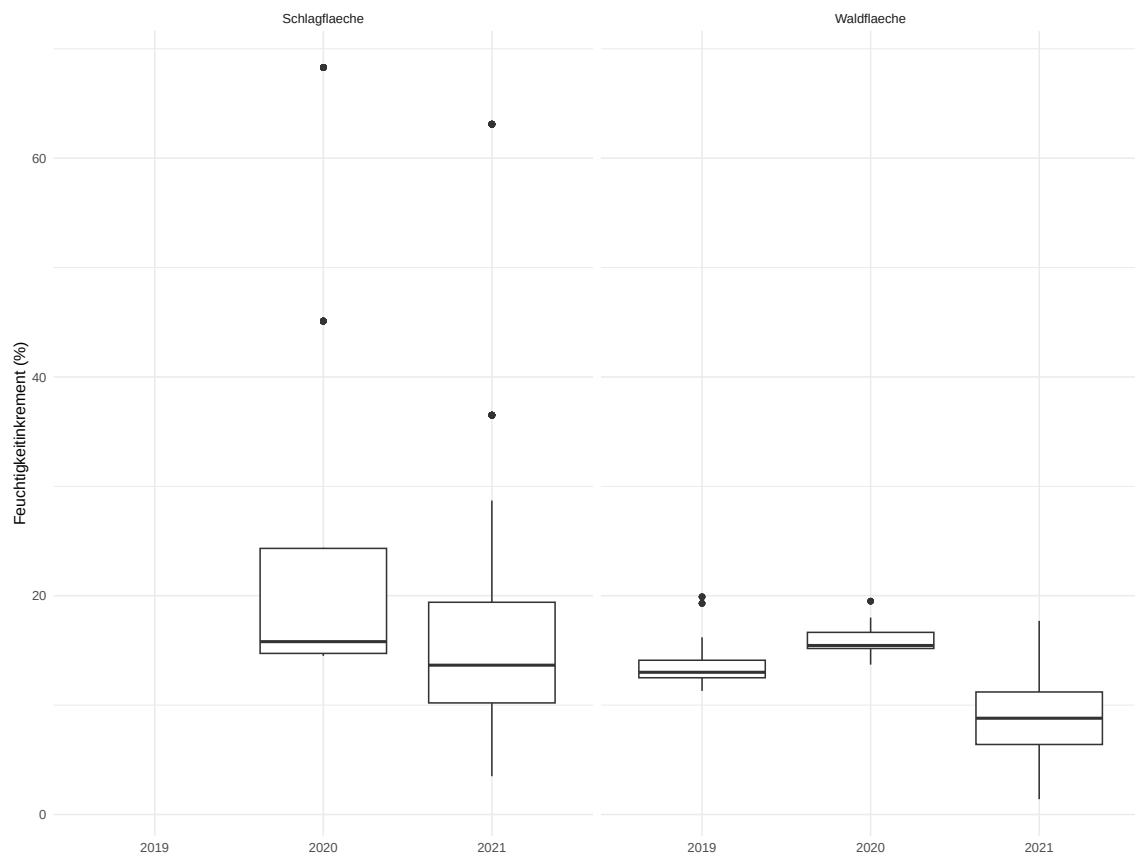


Abbildung 10: Messwerte des Feuchtigkeitinkrements zur Quantifizierung des Bodenwassers aus den Messstationen für jedes berücksichtigte Ereignis. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Feuchtigkeitinkrements.

Tabelle 20: Quantile der Feuchtigkeitinkremente gemessen mit den Messstationen zur Quantifizierung des Bodenwassers.

Standort	Jahr	25 % Quantil (%)	50 % Quantil (%)	75 % Quantil (%)
Waldfläche	2019	12.5	13.0	14.1
Waldfläche	2020	15.175	15.450	16.650
Waldfläche	2021	6.4	8.8	11.2
Schlagfläche	2019	-	-	-
Schlagfläche	2020	14.725	15.800	24.325
Schlagfläche	2021	10.20	13.65	19.40

Mit der Varianzanalyse zum Bodenwasser werden die signifikanten Einflussvariablen für das Feuchtigkeitinkrement als Zielvariable bestimmt (Tabelle 21). Demnach sind der Standort, die Sukzessionszeit, die Vorfeuchtigkeit und die Regenhöhe signifikant, nicht jedoch die Ereignisdauer.

Tabelle 21: Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitinkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Standort	84.90	0.04418	0.001
Sukzessionszeit	166.06	0.08642	0.001
Vorfeuchtigkeit	1285.78	0.66913	0.001
$\ln(\text{Regenhöhe})$	11.49	0.00598	0.001
$\ln(\text{Regendauer})$	0.21	0.00011	0.665
Standort:Sukzessionszeit	12.67	0.00660	0.001
Standort:Vorfeuchtigkeit	27.63	0.01438	0.001
Standort: $\ln(\text{Regenhöhe})$	2.63	0.00137	0.115
Standort: $\ln(\text{Regendauer})$	0.18	0.00009	0.665

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für das Feuchtigkeitinkrement wird ein gemischtes Modell zum Oberflächenabfluss für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 22). Tendenziell ist das Feuchtigkeitinkrement auf der Waldfläche grösser als auf der Schlagfläche und nimmt mit zunehmender Vorfeuchtigkeit ab und mit zunehmender Regenhöhe zu. Auf der Schlagfläche nimmt

das Feuchtigkeitsinkrement mit zunehmender Sukzessionszeit zu, während das Feuchtigkeitsinkrement auf der Waldfläche mit zunehmender Sukzessionszeit abnimmt.

Tabelle 22: Regression (LMER) des Bodenwassers mit $\ln(\text{Feuchtigkeitinkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort:Sukzes	0.03090	0.1758	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	0.33142	0.43327	0.765
(Schlagfläche)	-	-	-0.32816	0.39779	-0.825
(Waldfläche):Su	-	-	-0.21298	0.28448	-0.749
(Schlagfläche):S	-	-	0.13130	0.25216	0.521
Vorfeuchtigkeit	-	-	-8.52029	0.25615	-33.262
$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	0.06487	0.01576	4.116

3.1.5 Bodenauswaschung

Die Grundlage für die Auswertung der Bodenauswaschung sind die mit 3 ausgewählten Kastenerosimeter erhobenen Daten zu den Stoffkonzentrationen von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Oberflächenabfluss. Die Zeitreihen zeigen nur deutliche Unterschiede zwischen den Teilflächen und über die Zeitspanne aber ähnliche Muster für die verschiedenen Stoffkonzentrationen (Figur 11).

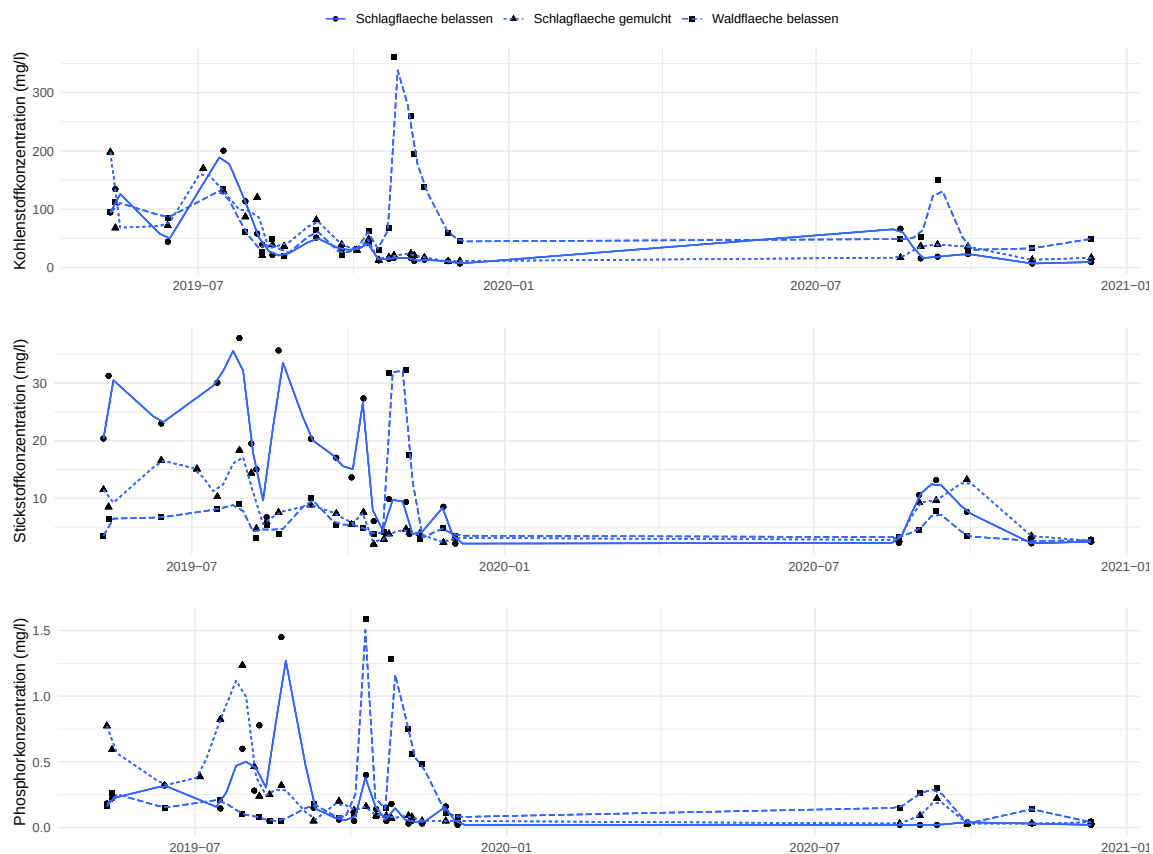


Abbildung 11: Messwerte der Stoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss zur Quantifizierung der Bodenauswaschung aus den Kastenerosimeter mit Kohlenstoff (oben), Stickstoff (mitte) und Phosphor (unten). Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Stoffkonzentrationen für jede Teilfläche und Behandlung.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Stoffkonzentrationen auf der Bezugsebenen von ausgewählten Regenereignissen über die Zeitspannen ist die Grundlage für die Quantifizierung des Bodenauswaschung. Die Quantile zeigen, dass sich die Stoffkonzentrationen auf der Waldfläche teilweise wesentlich von der Schlagfläche unterscheiden aber dass die Tendenz über die Zeitspanne ähnlich ist (Figur 10, Tabelle 23, Tabelle 24, Tabelle 25).

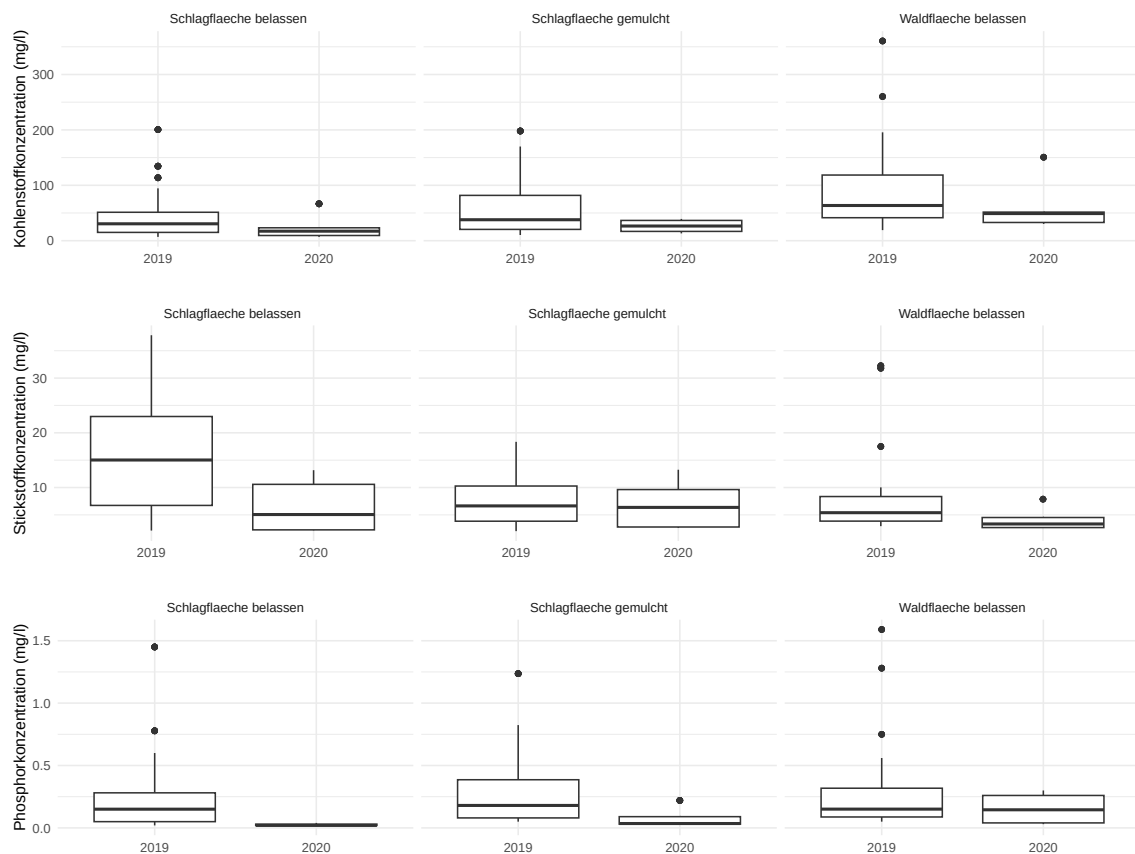


Abbildung 12: Messwerte der Stoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss zur Quantifizierung der Bodenauswaschung aus den Kastenerosimeter mit Kohlenstoff (oben), Stickstoff (mitte) und Phosphor (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Stoffkonzentrationen.

Tabelle 23: Quantile der Stoffkonzentration von Kohlenstoff im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.

Standort	Jahr	25 % Quantil (mg/l)	50 % Quantil (mg/l)	75 % Quantil (mg/l)
Waldfläche belassen	2019	41.50	63.55	118.50
Waldfläche belassen	2020	32.9	49.0	51.6
Schlagfläche belassen	2019	15.0	30.5	51.3
Schlagfläche belassen	2020	9.4	17.2	23.3
Schlagfläche gemulcht	2019	20.40	37.85	81.80
Schlagfläche gemulcht	2020	16.8	26.5	36.6

Tabelle 24: Quantile der Stoffkonzentration von Stickstoff im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.

Standort	Jahr	25 % Quantil (mg/l)	50 % Quantil (mg/l)	75 % Quantil (mg/l)
Waldfläche belassen	2019	3.8625	5.4000	8.3540
Waldfläche belassen	2020	2.680	3.340	4.520
Schlagfläche belassen	2019	6.730	15.030	22.980
Schlagfläche belassen	2020	2.2650	5.0635	10.5800
Schlagfläche gemulcht	2019	3.8450	6.6425	10.2740
Schlagfläche gemulcht	2020	2.7850	6.3675	9.6300

Tabelle 25: Quantile der Stoffkonzentration von Phosphor im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.

Standort	Jahr	25 % Quantil (mg/l)	50 % Quantil (mg/l)	75 % Quantil (mg/l)
Waldfläche belassen	2019	0.0875	0.1505	0.3180
Waldfläche belassen	2020	0.040	0.145	0.260
Schlagfläche belassen	2019	0.050	0.150	0.281
Schlagfläche belassen	2020	0.02	0.02	0.03
Schlagfläche gemulcht	2019	0.080	0.180	0.386
Schlagfläche gemulcht	2020	0.03	0.035	0.09

Mit der Varianzanalyse zur Bodenauswaschung werden die signifikanten Einflussvariablen für die Stoffkonzentrationen als Zielvariable bestimmt (Tabelle 26). Demnach sind der Standort und die Sukzessionszeit für alle Stoffkonzentrationen signifikant. Die Abflusshöhe ist nur für die Stoffkonzentration von Phosphor signifikant.

Tabelle 26: Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Bodenauswaschung mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ im Oberflächenabflusses gemessen mit den Kastenerosimeter als Zufallsvariablen.

Stoffkonzentration	Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Kohlenstoff	Standort	8.1187	0.16111	0.001
Kohlenstoff	Sukzessionszeit	4.3123	0.04279	0.030
Kohlenstoff	$\ln(\text{Abflusshöhe})$	2.1266	0.02110	0.162
Kohlenstoff	Standort:Sukzession	0.1623	0.00322	0.852
Kohlenstoff	Standort: $\ln(\text{Abfluss})$	2.8930	0.05741	0.070
Stickstoff	Standort	5.0575	0.10322	0.010
Stickstoff	Sukzessionszeit	7.8348	0.07995	0.009
Stickstoff	$\ln(\text{Abflusshöhe})$	0.8177	0.00834	0.395
Stickstoff	Standort:Sukzession	1.4494	0.02958	0.236
Stickstoff	Standort: $\ln(\text{Abfluss})$	2.1655	0.04419	0.115
Phosphor	Standort	2.6784	0.04475	0.080
Phosphor	Sukzessionszeit	21.5988	0.18046	0.001
Phosphor	$\ln(\text{Abflusshöhe})$	2.9127	0.02434	0.077
Phosphor	Standort:Sukzession	2.2353	0.03735	0.116
Phosphor	Standort: $\ln(\text{Abfluss})$	6.6757	0.11155	0.004

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Stoffkonzentrationen werden gemischte Modelle zur Bodenauswaschung für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 27, Tabelle 28, Tabelle 29). Tendenziell nehmen die Stoffkonzentrationen auf der Waldfläche und der Schlagfläche mit Behandlung mit zunehmender Sukzessionszeit zu, während die Stoffkonzentrationen auf der Schlagfläche ohne Behandlung mit zunehmender Sukzessionszeit abnehmen. Die Stoffkonzentration von Phosphor nimmt mit zunehmender Abflusshöhe ab.

Tabelle 27: Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Kohlenstoff mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.5569	0.7462	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	0.82613	0.58051	1.423
(Schlagfläche belassen)	-	-	-3.49224	0.76823	-4.546
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	0.26367	0.57777	0.456
(Waldfläche belassen): Sukzession:	-	-	0.24795	0.54908	0.452
(Schlagfläche belassen): Sukzession:	-	-	-0.54842	0.38718	-1.416
(Schlagfläche gemulcht): Sukzession:	-	-	0.05084	0.54617	0.093

Tabelle 28: Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Stickstoff mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.4356	0.6600	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	-0.6580	0.4139	-1.590
(Schlagfläche belassen)	-	-	-4.3906	0.2916	-15.057
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	-0.6699	0.4110	-1.630
(Waldfläche belassen):Sukzession:	-	-	0.4011	0.4746	0.845
(Schlagfläche belassen):Sukzession:	-	-	-0.9384	0.3346	-2.804
(Schlagfläche gemulcht):Sukzession:	-	-	0.8091	0.4721	1.714

Tabelle 29: Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Phosphor mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.1372	0.3704	-	-	-
(Waldfläche belassen)	-	-	0.13325	0.61777	0.216
(Schlagfläche belassen)	-	-	-9.39866	0.52143	-18.025
(Schlagfläche gemulcht)	-	-	0.38615	0.60841	0.635
(Waldfläche belassen): Sukzession:	-	-	1.27393	0.98965	1.287
(Schlagfläche belassen): Sukzession:	-	-	-1.49767	0.71254	-2.102
(Schlagfläche gemulcht): Sukzession:	-	-	0.44513	0.98750	0.451
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	-	-	-0.14494	0.08705	-1.665

3.1.6 Bodenbedeckung

Die Grundlage für die Auswertung der Bodenbedeckung sind die mit den 10 Kastenerosimeter erhobenen Daten zu den Deckungsgraden von Vegetation und Blattstreu. Die Zeitreihen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Teilflächen und über die Zeitspanne sowie für die verschiedenen Deckungsgrade (Figur 13).

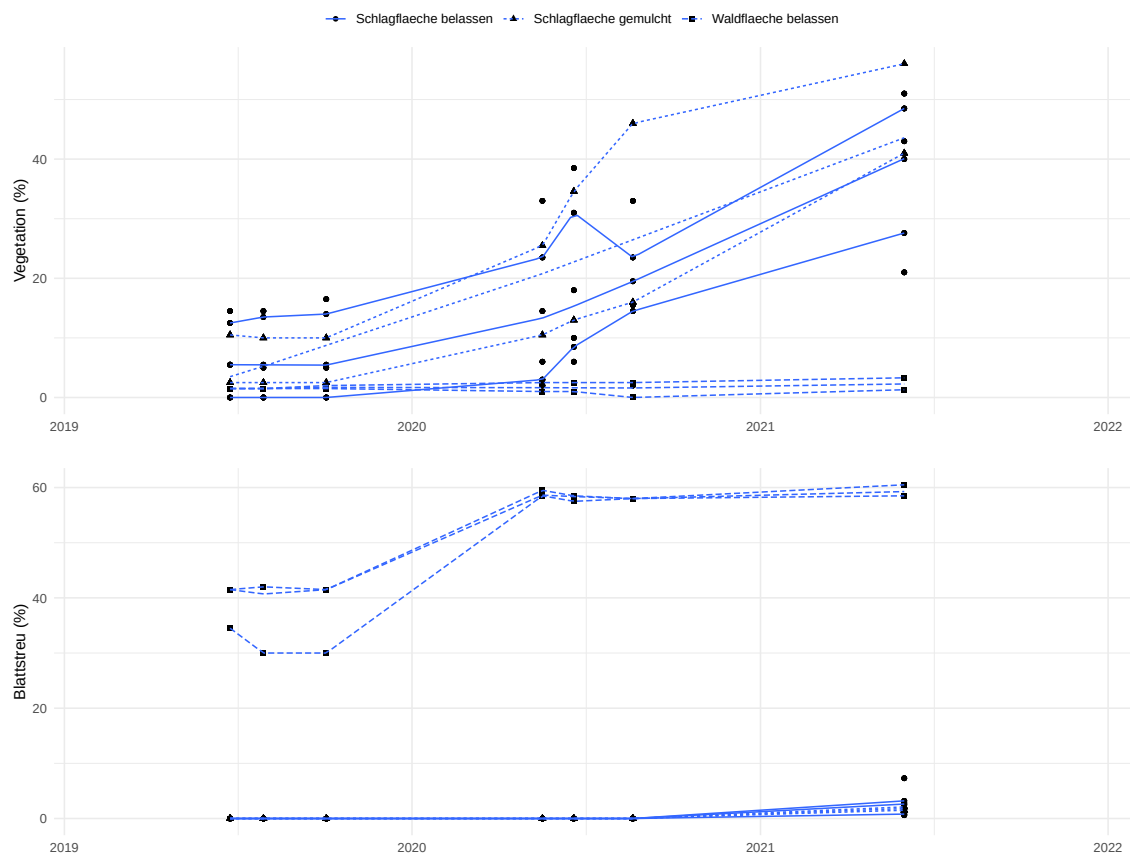


Abbildung 13: Messwerte der Deckungsgrade zur Quantifizierung der Bodenbedeckung in den Kasteneosimeter aufgeteilt in Vegetation (oben) und Blattsreu (unten). Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Deckungsgrade für jede Teilfläche und Behandlung.

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Deckungsgrade auf der Bezugsebenen von ausgewählten Regenereignisses über die Zeitspannen ist die Grundlage für die Quantifizierung des Bodenbedeckung. Die Quantile zeigen, dass sich die Deckungsgrade auf der Waldfläche wesentlich von der Schlagfläche unterscheiden und dass die Tendenz über die Zeitspanne unterschiedlich ist (Figur 14, Tabelle 30, Tabelle 31).

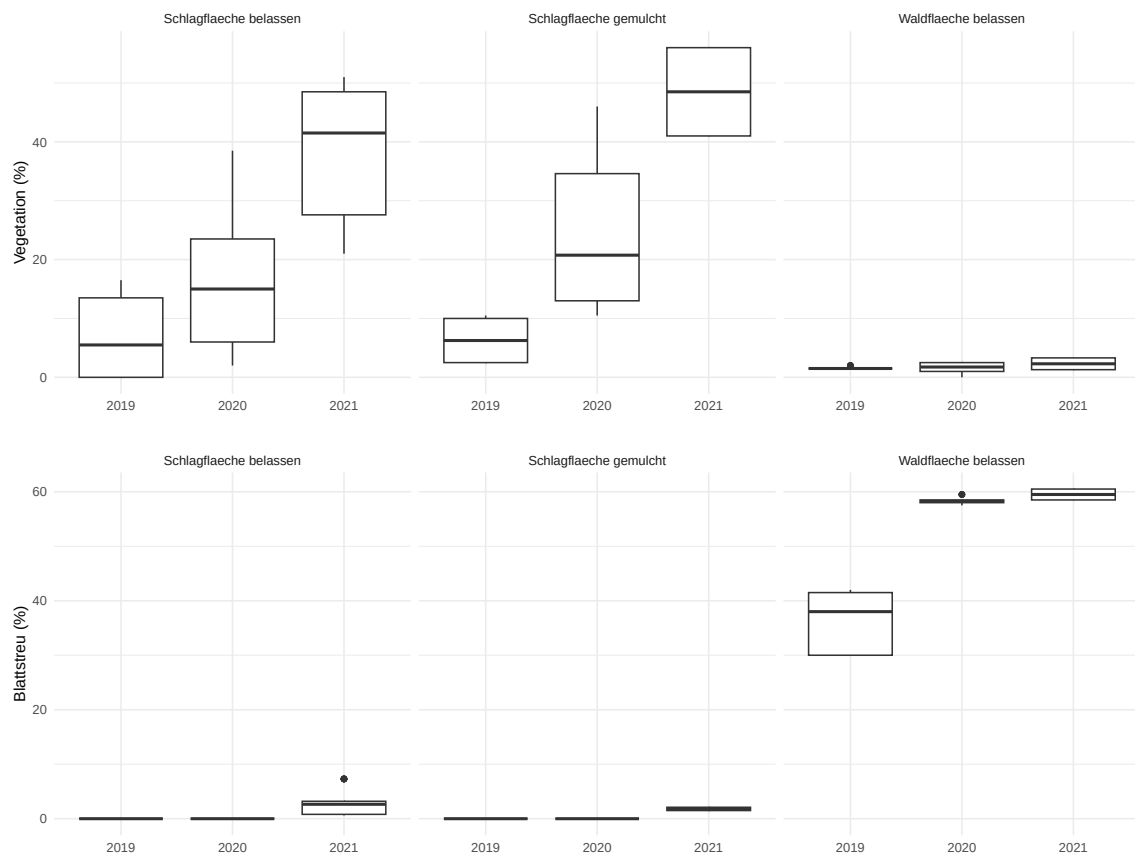


Abbildung 14: Messwerte der Deckungsgrade zur Quantifizierung der Bodenbedeckung in den Kastene-
rosimeter aufgeteilt in Vegetation (oben) und Blattstreu (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25
%, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Deckungsgrade.

Tabelle 30: Quantile der Deckungsgrade der Vegetation gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.

Standort	Jahr	25 % Quantil (%)	50 % Quantil (%)	75 % Quantil (%)
Waldfläche belassen	2019	1.5	1.5	1.5
Waldfläche belassen	2020	1.00	1.75	2.50
Waldfläche belassen	2021	1.3	2.3	3.3
Schlagfläche belassen	2019	0.0	5.5	13.5
Schlagfläche belassen	2020	6.0	15.0	23.5
Schlagfläche belassen	2021	27.6	41.5	48.5
Schlagfläche gemulcht	2019	2.50	6.25	10.00
Schlagfläche gemulcht	2020	13.00	20.75	34.60
Schlagfläche gemulcht	2021	41.0	48.5	56.0

Tabelle 31: Quantile der Deckungsgrade der Blattstreu gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.

Standort	Jahr	25 % Quantil (%)	50 % Quantil (%)	75 % Quantil (%)
Waldfläche belassen	2019	30.0	38.0	41.5
Waldfläche belassen	2020	58.00	58.25	58.50
Waldfläche belassen	2021	58.5	59.5	60.5
Schlagfläche belassen	2019	-	-	-
Schlagfläche belassen	2020	-	-	-
Schlagfläche belassen	2021	0.80	2.65	3.20
Schlagfläche gemulcht	2019	-	-	-
Schlagfläche gemulcht	2020	-	-	-
Schlagfläche gemulcht	2021	1.5	1.8	2.1

Mit der Varianzanalyse zur Bodenbedeckung werden die signifikanten Einflussvariablen für die Deckungsgrade als Zielvariable bestimmt (Tabelle 32). Demnach ist nur der Standort für alle Deckungsgrade signifikant. Die Hangneigung und die Sukzessionszeit sind nur für den Deckungsgrad der Vegetation signifikant, nicht jedoch für den Deckungsgrad der Blattstreu.

Tabelle 32: Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Bodenbedeckung mit $\ln(\text{Deckungsgrad})$ gemessen mit den Kastenerosimeter als Zufallsvariablen.

Deckungsgrad	Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Vegetation	Standort	51.476	0.49292	0.001
Vegetation	Hangneigung	2.155	0.01032	0.145
Vegetation	Sukzessionszeit	30.491	0.14599	0.001
Vegetation	Standort:Hangneigung	4.768	0.04566	0.012
Vegetation	Standort:Sukzessionszeit	4.863	0.04656	0.007
Blattstreu	Standort	84.405	0.90599	0.001
Blattstreu	Hangneigung	0.000	0.00000	0.994
Blattstreu	Sukzessionszeit	2.107	0.01131	0.168
Blattstreu	Standort:Hangneigung	0.205	0.00220	0.812
Blattstreu	Standort:Sukzessionszeit	-	-	-

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Deckungsgrade werden gemischte Modelle zur Bodenauswaschung für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 33). Tendenziell ist der Deckungsgrad der Vegetation auf der Schlagfläche grösser als auf der Waldfläche, während der Deckungsgrad der Blattstreu auf der Waldfläche grösser ist als auf der Schlagfläche. Der Deckungsgrad der Vegetation nimmt mit zunehmender Hangneigung zu und auf der Schlagfläche mit zunehmender Sukzessionszeit zu aber auf der Waldfläche mit zunehmender Sukzessionszeit ab.

Tabelle 33: Regression (LMER) der Bodenbedeckung mit $\ln(\text{Deckungsgrad})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.

Deckungsgr	Einflussvaria	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Vegetation	Standort	0.02992	0.1730	-	-	-
Vegetation	(Waldfläche belassen)	-	-	-1.4933	0.4060	-3.678
Vegetation	(Schlagfläche belassen)	-	-	-3.5960	1.4031	-2.563
Vegetation	(Schlagfläche gemulcht)	-	-	-0.2250	0.4098	-0.549
Vegetation	Hangneigung	-	-	1.5997	2.1707	0.737
Vegetation	(Waldfläche belassen):Sukzessi	-	-	-0.5299	0.3578	-1.481
Vegetation	(Schlagfläche belassen):Sukzessi	-	-	0.6606	0.2087	3.166
Vegetation	(Schlagfläche gemulcht):Sukz	-	-	0.5245	0.3570	1.469
Blatt	Standort	2.6892	1.6399	-	-	-
Blatt	(Waldfläche belassen)	-	-	3.1372	2.3335	1.344
Blatt	(Schlagfläche belassen)	-	-	-3.8780	1.6541	-2.345
Blatt	(Schlagfläche gemulcht)	-	-	-0.1535	2.3591	-0.065

3.2 Punktmessungen

3.2.1 Oberflächenabfluss

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Abflusshöhen mit den 10 Regensimulatoren ist eine Ergänzung für die Quantifizierung des Oberflächenabflusses. Die Quantile zeigen, dass sich die Abflusshöhen auf der Waldfläche wesentlich von der Schlagfläche unterscheiden (Figur 15, Tabelle 34).

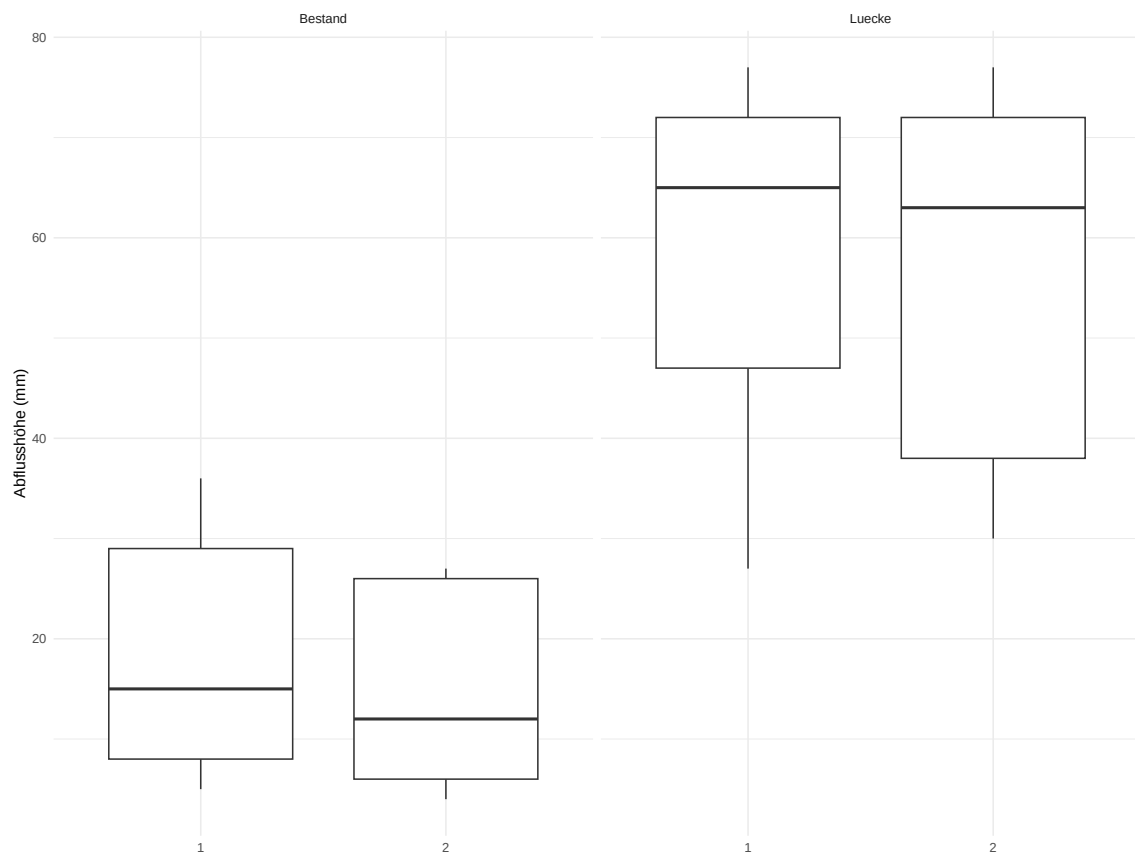


Abbildung 15: Messwerte der Abflusshöhe zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Abflusshöhe.

Tabelle 34: Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses.

Standort	Experiment	25 % Quantil (mm)	50 % Quantil (mm)	75 % Quantil (mm)
Bestand	1	8	15	29
Bestand	2	6	12	26
Lücke	1	47	65	72
Lücke	2	38	63	72

Mit der Varianzanalyse zum Oberflächenabfluss werden die signifikanten Einflussvariablen für die Abflusshöhe als Zielvariable bestimmt (Tabelle 35). Demnach sind der Standort und die Vorfeuchtigkeit signifikant, nicht jedoch die Hangneigung.

Tabelle 35: Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Standort	54.876	0.57930	0.001
Hangneigung	0.289	0.00305	0.606
Vorfeuchtigkeit	5.203	0.05492	0.032
Standort:Hangneigung	0.001	0.00001	0.983
Standort:Vorfeuchtigkeit	0.360	0.00380	0.558

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Abflusshöhe wird ein gemischtes Modell zum Oberflächenabfluss für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 36). Tendenziell ist die Abflusshöhe auf der Schlagfläche grösser als auf der Waldfläche und nimmt mit zunehmender Vorfeuchtigkeit ab.

Tabelle 36: Regression (LMER) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	2.9285	1.7113	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	-1.492	2.427	-0.615
(Schlagfläche)	-	-	-2.149	1.746	-1.230
Vorfeuchtigkeit	-	-	-4.105	1.689	-2.430

3.2.2 Oberflächenerosion

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Erosionsmassen mit den 10 Regensimulatoren ist eine Ergänzung für die Quantifizierung der Oberflächenerosion. Die Quantile zeigen, dass sich die Erosionsmassen auf der Waldfläche wesentlich von der Schlagfläche unterscheiden (Figur 16, Tabelle 37).

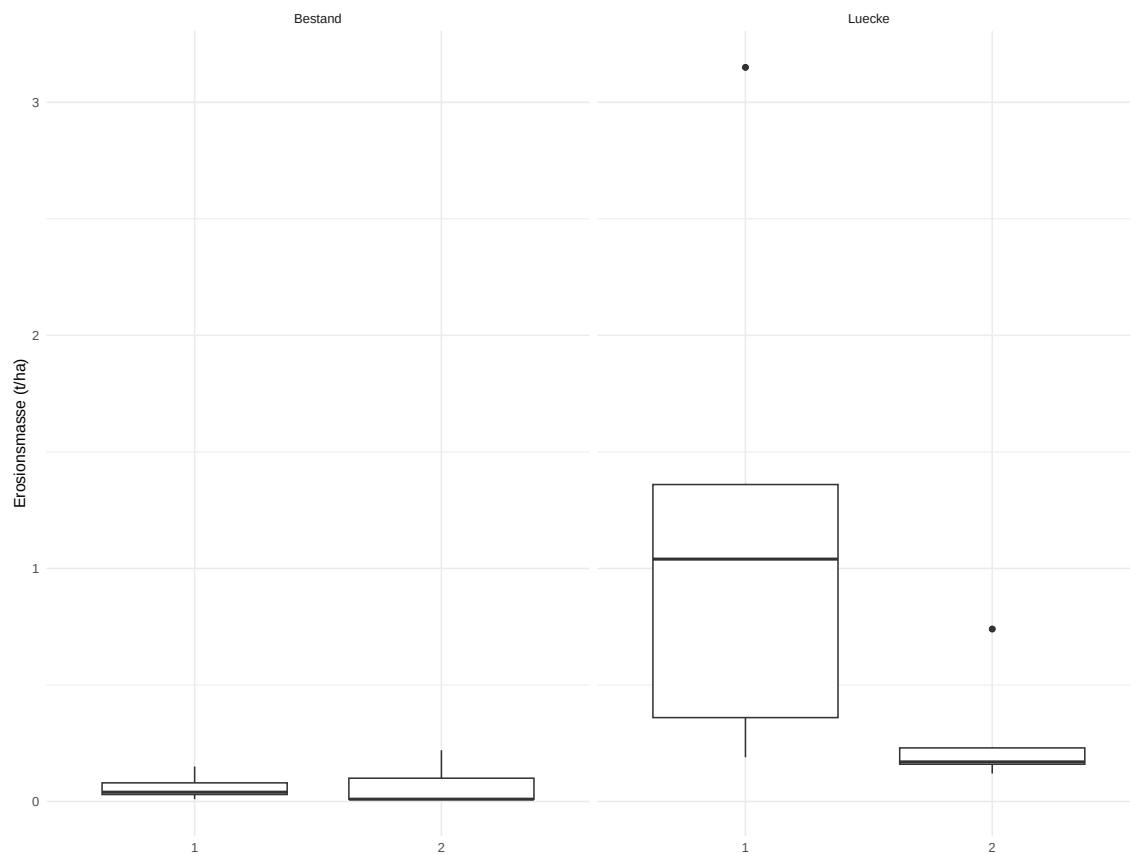


Abbildung 16: Messwerte der Erosionsmasse zur Quantifizierung der Oberflächenerosion aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Erosionsmasse.

Tabelle 37: Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung der Oberflächenerosion.

Standort	Experiment	25 % Quantil (t/ha)	50 % Quantil (t/ha)	75 % Quantil (t/ha)
Bestand	1	0.03	0.04	0.08
Bestand	1	0.01	0.01	0.10
Lücke	1	0.36	1.04	1.36
Lücke	2	0.16	0.17	0.23

Mit der Varianzanalyse zur Oberflächenerosion werden die signifikanten Einflussvariablen für die Erosionsmasse als Zielvariable bestimmt (Tabelle 38). Demnach sind der Standort, die Hangneigung und die Abflusshöhe signifikant.

Tabelle 38: Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Standort	70.485	0.55444	0.001
Hangneigung	1.958	0.01540	0.180
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	0.220	0.00173	0.640
Standort:Hangneigung	10.188	0.08014	0.004
Standort: $\ln(\text{Abflusshöhe})$	10.278	0.08084	0.004

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Erosionsmasse wird ein gemischtes Modell zum Oberflächenabfluss für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 36). Tendenziell ist die Erosionsmasse auf der Schlagfläche grösser als auf der Waldfläche. Weiterhin nimmt die Erosionsmasse mit zunehmender Hangneigung und mit zunehmender Abflusshöhe zu.

Tabelle 39: Regression (LMER) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.3677	0.6064	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	-2.4542	1.0371	-2.367
(Schlagfläche)	-	-	-5.1804	2.4641	-2.102
Hangneigung	-	-	3.8184	3.4685	1.101
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	-	-	0.1147	0.3006	0.381

3.2.3 Bodenwasser

Die Aufteilung der gemessenen Werte für die Feuchtigkeitsinkremente mit den 10 Regensimulatoren ist eine Ergänzung für die Quantifizierung des Bodenwassers. Die Quantile zeigen, dass sich die Feuchtigkeitsinkrement auf der Waldfläche kaum von der Schlagfläche unterscheiden (Figur 17, Tabelle 40).

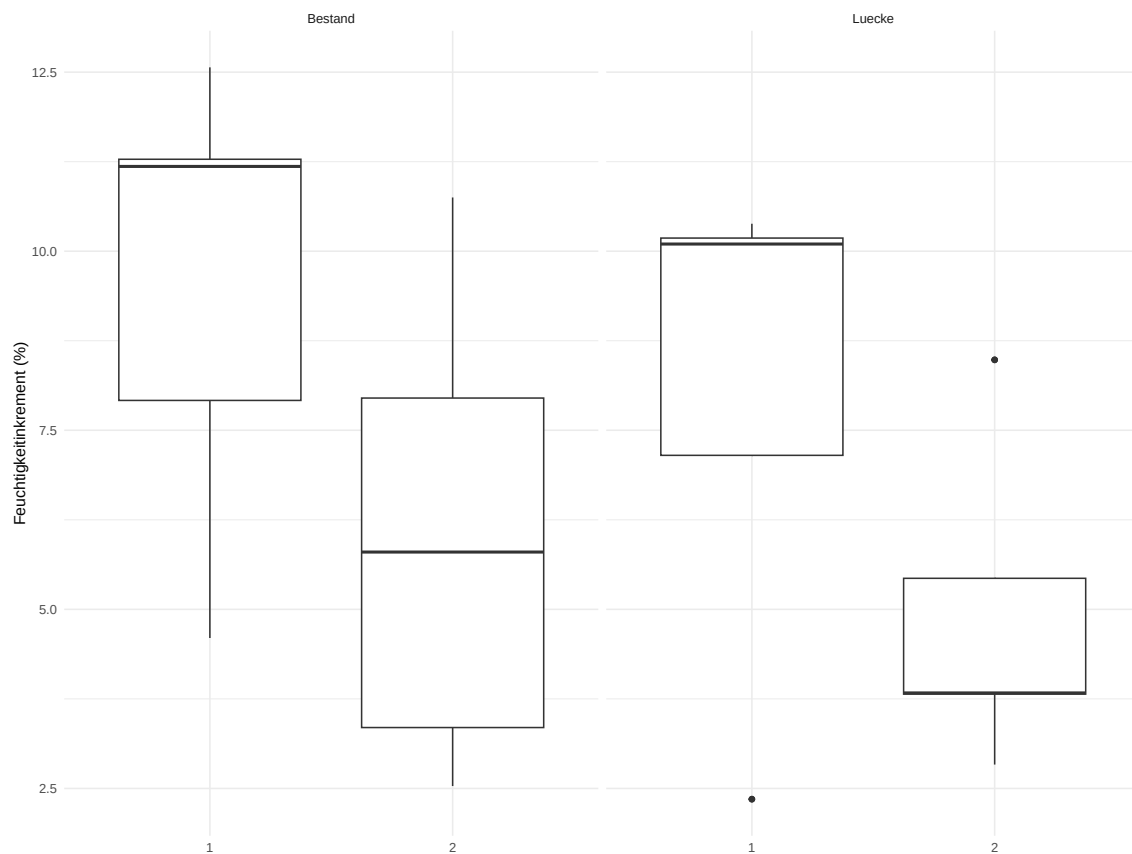


Abbildung 17: Messwerte des Feuchtigkeitinkrements zur Quantifizierung des Bodenwassers aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Feuchtigkeitinkrements.

Tabelle 40: Quantile der Feuchtigkeitinkremente gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung des Bodenwassers.

Standort	Experiment	25 % Quantil (%)	50 % Quantil (%)	75 % Quantil (%)
Bestand	1	7.916667	11.183333	11.283333
Bestand	2	3.350000	5.800000	7.950000
Lücke	1	7.15000	10.10000	10.18333
Lücke	2	3.816667	3.833333	5.433333

Mit der Varianzanalyse zum Bodenwasser werden die signifikanten Einflussvariablen für das Feuchtigkeitsinkrement als Zielvariable bestimmt (Tabelle 41). Demnach ist keine der berücksichtigten Einflussvariablen signifikant.

Tabelle 41: Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitsinkrement})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	F.Model	R2	Pr(>F)
Standort	1.95811	0.03300	0.154
Hangneigung	2.33982	0.03943	0.120
Vorfeuchtigkeit	0.11841	0.00200	0.708
Standort:Hangneigung	0.62164	0.01048	0.444
Standort:Initialfeuchtigkei	0.30555	0.00515	0.562

Ausgehend von den signifikanten Einflussvariablen für die Feuchtigkeitsinkremente wird ein gemischtes Modell zum Bodenwasser für eine detaillierte Betrachtung der Effekte ausgewertet (Tabelle 42). Weil keine signifikanten Einflussvariablen identifiziert werden können, wird nur der Standort berücksichtigt. Dies zeigt, dass auf der Waldfläche tendenziell mehr Bodenwasser aufgenommen werden kann als auf der Schlagfläche.

Tabelle 42: Regression (LMER) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitsinkrement})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.009915	0.09957	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	0.1958	0.1980	0.989
(Schlagfläche)	-	-	-2.8701	0.1400	-20.501

3.3 Flächenaufnahmen

3.3.1 Grundlagenkarten

Die Grundlagen für die Auswertung der Flächenaufnahmen sind die 3 Drohnenbilder auf der Schlagfläche (Figur 18). Diese enthalten die notwendigen Informationen über die Spektralbänder und die Höhenlage.

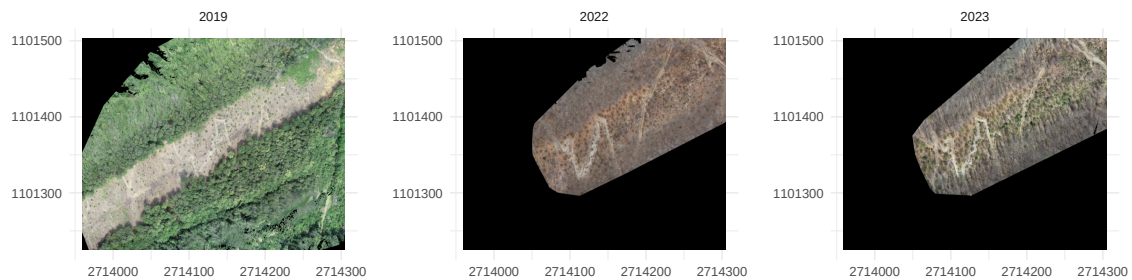


Abbildung 18: Karten der Drohnenbilder als Orthomosaik auf der Fläche des Holzschlags für die Jahre 2019, 2022 und 2023.

Auf dem Orthomosaik sind die Schlagfläche und die benachbarte Waldfläche klar sichtbar. Bereits im Juni 2019 kurz nach dem Holzschlag ist eine Erholung der Vegetation sichtbar, auch durch Stockausschlag der Kastanien. Im März 2022 ist die Vegetation visuell noch kaum wahrnehmbar, wird aber mit dem VDVI dennoch teilweise identifiziert. Das Ausmass der Erholung ist dann im April 2023 gut sichtbar.

3.3.2 Oberflächenerosion

Auf der Grundlage der Drohnenbilder können die Flächen mit Oberflächenerosion überall dort identifiziert werden, wo der Boden nicht mit Vegetation bedeckt ist. Dabei zeigen sich grosse räumliche und zeitliche Unterschiede im Erosionsvolumen (Figur 19, Tabelle 43).

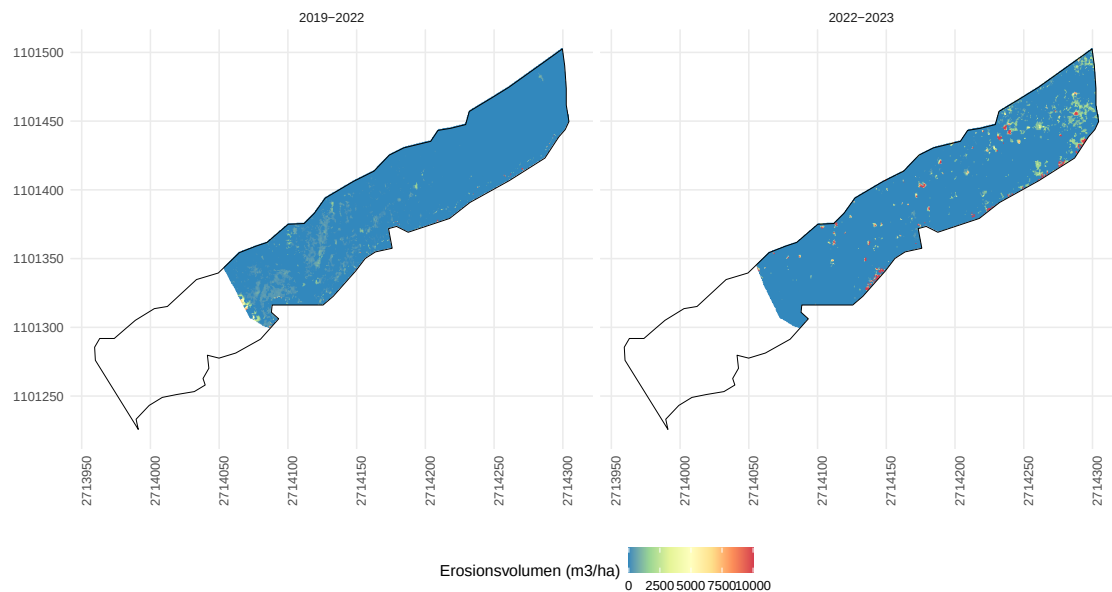


Abbildung 19: Karten der jährlichen Erosionsvolumen für die Differenzen zwischen 2019 und 2022 sowie zwischen 2022 und 2023.

Tabelle 43: Quantile der jährlichen Erosionsvolumen berechnet aus den Drohnenbildern zur Quantifizierung der Oberflächenerosion.

Zeitspanne	25 % Quantil (m³/ha)	50 % Quantil (m³/ha)	75 % Quantil (m³/ha)
2019-2022	177	323	472
2022-2023	861	1468	2674

Nach dem Holzschlag ist der obere Bereich der Schlagfläche stärker von Oberflächenerosion betroffen, während dann später der untere Bereich der Schlagfläche stärker betroffen ist. Die Werte des Erosionsvolumens nehmen mit der Zeit zu während die Differenz in der betroffenen Fläche von 2 % auf 1

% abnimmt. Unter der Annahme einer Massendichte des Bodens in der Grössenordnung von 1 t/m^3 können die Werte des Erosionsvolumens mit den Werten der Erosionsmasse aus den Kastenerosimeter verglichen werden und liegen demnach deutlich höher.

3.3.3 Bodenbedeckung

Auf der Grundlage der Drohnenbilder können die Flächen mit Vegetationszuwachs überall dort identifiziert werden, wo der Boden mit Vegetation bedeckt ist. Dabei zeigen sich nur kleine räumliche aber grosse zeitliche Unterschiede im Vegetationszuwachs (Figur 20, Tabelle 44).

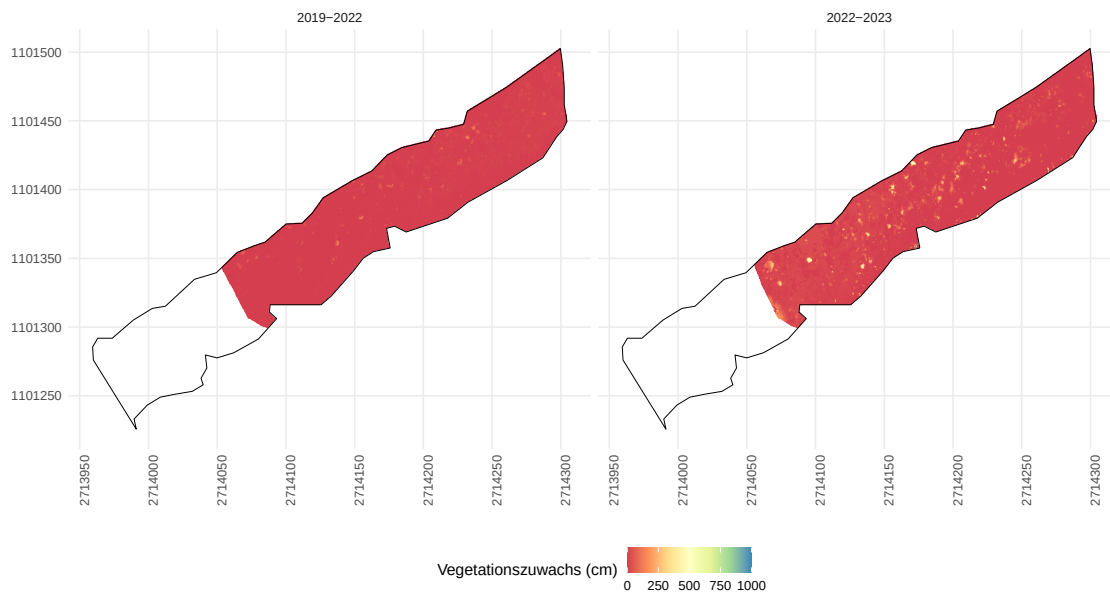


Abbildung 20: Karten der jährlichen Vegetationszuwachs für die Differenzen zwischen 2019 und 2022 sowie zwischen 2022 und 2023.

Tabelle 44: Quantile des Vegetationszuwachses berechnet aus den Drohnenbildern zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.

Zeitspanne	25 % Quantil (cm)	50 % Quantil (cm)	75 % Quantil (cm)
2019-2022	3	6	9
2022-2023	9	16	25

Die Bodenbedeckung mit Vegetation erholt sich nach dem Holzschlag auf der gesamten Schlagfläche. Die Werte des Vegetationszuwachses nehmen mit der Zeit zu und die Differenz in der betroffene Fläche nimmt von 7 % auf 8 % zu. Dies ergibt eine Schätzung für die Rate der Erholung des Deckungsgrades der Vegetation in der Grössenordnung von einigen 1 %/yr, welche demnach deutlich tiefer liegen als die Werte in den Kastenerosimetern in der Grössenordnung von einigen 10 %/yr.

3.4 Modellrechnungen

3.4.1 Oberflächenabfluss

Die Modellierung des Oberflächenabflusses mit dem gemischten linearen Modell wird so modifiziert, dass es für eine räumliche und zeitliche Aufskalierung verwendet werden kann (Tabelle 45). Demnach nimmt die Abflusshöhe mit zunehmender Sukzessionszeit ab und mit zunehmender Regenhöhe zu.

Tabelle 45: Modellierung (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable für die Aufskalierung der Prozesse.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	0.12564	0.3545	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	-0.698537	0.524579	-1.332
(Schlagfläche)	-	-	0.945862	0.359544	2.631
(Waldfläche):Su	-	-	-0.324657	0.123704	-2.624
(Schlagfläche):S	-	-	-0.002773	0.067483	-0.041
$\ln(\text{Regenhöhe})$	-	-	0.200614	0.044183	4.541

Mit dem linearen gemischten Modell kann der Oberflächenabfluss auf das Teileinzugsgebiet und über mehrere Jahre aufskaliert werden (Tabelle 21). Dafür wird nur für die Situation ohne Wald eine zeitliche Entwicklung angenommen, während sich die Situation mit Wald auf die modellierten Anfangsbedingun-

gen bezieht. Weiterhin wird ein oberer Grenzwert für die Einzugsfläche von 1000 m² angesetzt mit der Annahme, dass die effektiven Werte nur bei extremen Regenereignissen überschritten werden.

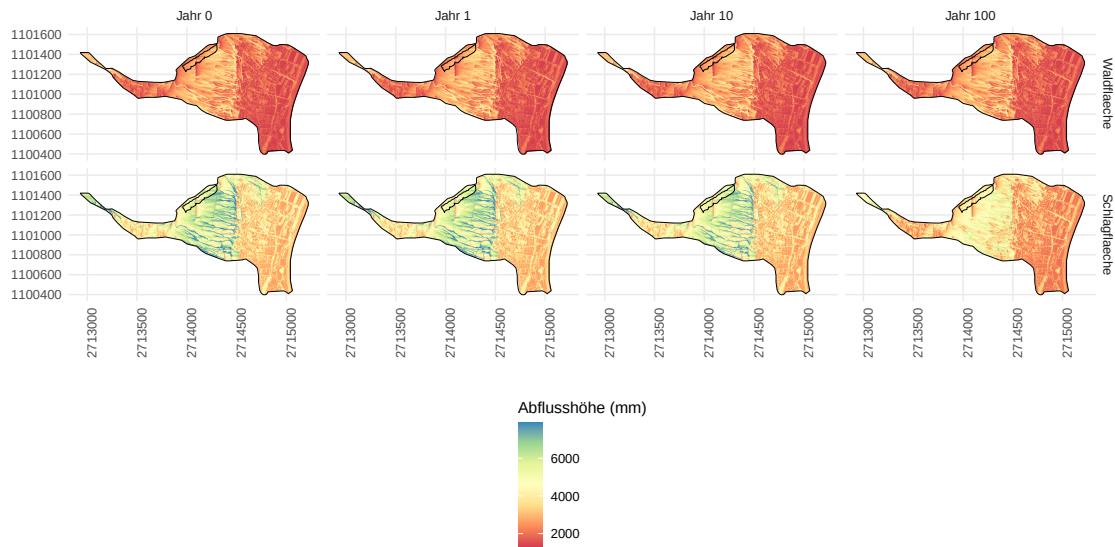


Abbildung 21: Karte der Modellwerte zum jährlichen Oberflächenabfluss im Teileinzugsgebiet um das Untersuchungsgebiet über verschiedenen Grössenordnungen der Sukzessionszeit.

3.4.2 Oberflächenerosion

Die Modellierung der Oberflächenerosion mit dem gemischten linearen Modell wird so modifiziert, dass es für eine räumliche und zeitliche Aufskalierung verwendet werden kann (Tabelle 46). Demnach nimmt die Erosionsmasse mit zunehmender Hangneigung und mit zunehmender Abflusshöhe zu. Auf der Schlagfläche nimmt die Erosionsmasse mit zunehmender Sukzessionszeit ab, während sie auf der Waldfläche mit zunehmender Sukzessionszeit scheinbar zunimmt.

Tabelle 46: Modellierung (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable für die Aufskalierung der Prozesse.

Einflussvariable	Variance	Std.Dev.	Estimate	Std. Error	t value
Standort	2.078	1.442	-	-	-
(Waldfläche)	-	-	-2.8291	2.3046	-1.228
(Schlagfläche)	-	-	-5.8649	2.5027	-2.343
Hangneigung	-	-	7.2300	2.7864	2.595
(Waldfläche):Su	-	-	1.9255	0.6010	3.204
(Schlagfläche):S	-	-	-0.1573	0.2557	-0.615
$\ln(\text{Abflusshöhe})$	-	-	2.0888	0.6431	3.248

Mit dem linearen gemischten Modell kann die Oberflächenerosion auf das Teileinzugsgebiet und über mehrere Jahre aufskaliert werden (Tabelle 22). Dafür wird nur für die Situation ohne Wald eine zeitliche Entwicklung angenommen, während sich die Situation mit Wald auf die modellierten Anfangsbedingungen bezieht. Weiterhin wird ein oberer Grenzwert für die Hangneigung von 50° angesetzt mit der Annahme, dass in steileren Bereichen kaum Boden aufgebaut werden kann.

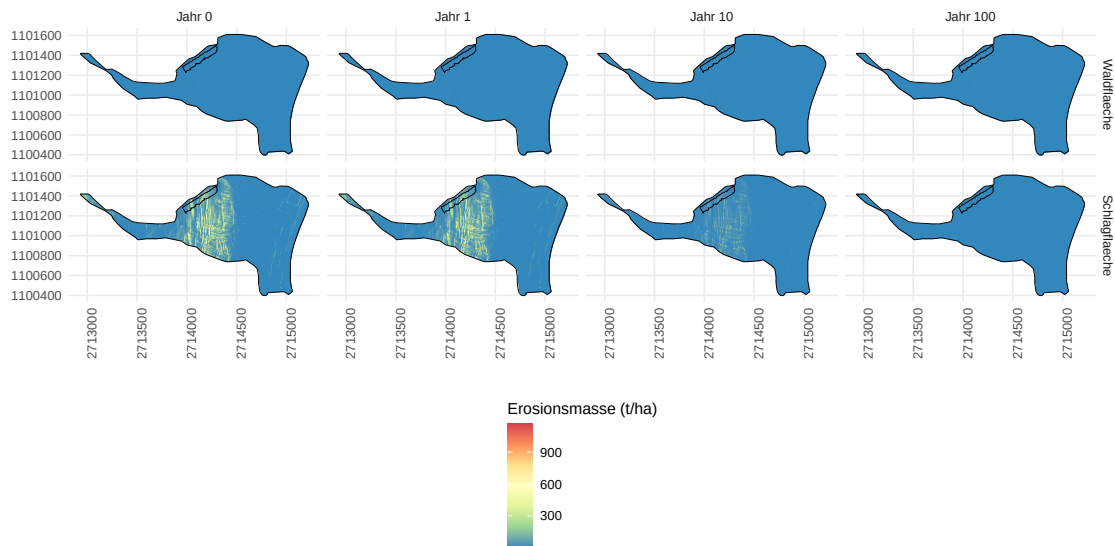


Abbildung 22: Karte der Modellwerte zur jährlichen Oberflächenerosion im Teileinzugsgebiet um das Untersuchungsgebiet über verschiedenen Grössenordnungen der Sukzessionszeit.

4 Diskussion

4.1 Wasserbilanz

4.1.1 Regeninterzeption

Die Regeninterzeption in den Baumkronen in der Waldfläche kann einen Teil des Niederschlags auffangen, so dass dieser nicht die Bodenoberfläche erreicht und weder zum Oberflächenabfluss noch zum Bodenwasser beiträgt [12]. Die Wirkung der Regeninterzeption auf der Waldfläche gegenüber der Kontrolle auf der Schlagfläche kann klar nachgewiesen werden und ist auf der Bezugsebene des Jahres deutlich ausgeprägter als auf der Bezugsebene des Regenereignisses. Dies zeigt sich am signifikanten Einfluss des

Standorts auf das Regeninkrement, weiterhin gibt es auch einen signifikanten Einfluss der Regenhöhe.

Die gemessenen Werte der Regeninterzeption stimmen gut überein mit der als Referenz verwendeten Wasserbilanz im Wald [10]. Demnach liegt die Regeninterzeption pro Regenereignis in der Grössenordnung von 1 mm und pro Jahr in der Grössenordnung von 100 mm. Neben dem direkten Einfluss der Regeninterzeption auf die Wasserbilanz hat auch die Verringerung der Fallenergie der Regentropfen durch die Baumkronen Auswirkungen sowohl auf den Oberflächenabfluss wie auch auf die Oberflächenerosion. Dieser Mechanismus wird in dieser Untersuchung nicht direkt betrachtet, sollte jedoch bei der Interpretation der Messungen mit berücksichtigt werden.

4.1.2 Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss auf der Bodenoberfläche entsteht dann, wenn ein Teil des Regenwassers nicht infiltrieren kann, weil die Durchlässigkeit oder das Speichervermögen des Bodens überschritten werden [13]. Auf der Waldfläche ist der Oberflächenabfluss deutlich geringer als auf der Schlagfläche, wobei dort die Behandlung keinen wesentlichen Einfluss hat. Dabei wird die Abflusshöhe signifikant vom Standort, von der Sukzessionszeit und von der Regenhöhe beeinflusst, nicht jedoch von der Hangneigung und von der Regendauer. Die Auswirkungen der Behandlung mit Mulch auf den Oberflächenabfluss sind vernachlässigbar. Die Punktmessungen mit den Regensimulatoren bestätigen die gemessenen Zeitreihen der Kastenerosimeter und zeigen eine signifikante Abhängigkeit der Abflusshöhe vom Standort und von der Vorgeuchtheit.

Die gemessenen Werte zu den Unterschieden im Oberflächenabfluss liegen im Bereich der als Referenz verwendeten Wasserbilanz im Wald [10]. Die Verringerung des Oberflächenabflusses liegt in der Grössenordnung von 10 mm pro Regenereignis und in der Grössenordnung von 1000 mm pro Jahr. Diese Werte liegen eine Grössenordnung über den Werten der Regeninterzeption, woraus folgt, dass die Unterschiede im Oberflächenabfluss vor allem auf die bessere Infiltration auf der Waldfläche gegenüber der Schlagfläche zurückgeführt werden können. Diese Unterschiede zwischen der Schlagfläche und der Waldfläche sind über die untersuchte Zeitspanne nicht klar von der Sukzessionszeit abhängig beziehungsweise die Muster sind auf beiden Teilflächen ähnlich. Weiterhin zeigen auch die Messungen mit den Regensimulatoren nach einer Sukzessionszeit von über 2 y ähnliche Unterschiede zwischen den Teilflächen. Dies impliziert, dass sich die potenzielle Infiltration nach dem Holzschlag rasch abnimmt aber nur langsam wieder zunimmt.

Die Zuordnung der gemessenen Abflusshöhen und Regenhöhen zu gebräuchlichen Abflussbeiwertklassen für Wildbachprozesse ermöglicht eine hydrologische Klassifizierung [9]. Für die Messungen der Kastenerosimeter ergibt dies für die Waldfläche hellgrün (10 bis 30 %) bis gelb (30 bis 50 %) und für die Schlagfläche gelb (30 bis 50 %) bis orange (50 bis 75 %). Für die Messungen der Regensimulatoren ist die Streuung geringer und die Zuordnung klarer mit hellgrün (10 bis 30 %) für die Waldfläche und orange (50 bis 75 %) für die Schlagfläche. Diese unterschiedlichen Abflussbeiwertklassen verdeutlichen die Unterschiede zwischen den beiden Teilflächen und die Verringerung der hydrologischen Schutzwirkung auf der Schlagfläche gegenüber der Waldfläche.

4.1.3 Bodenwasser

Das Bodenwasser im Oberboden wird neben dem Speichervermögen durch die Infiltration, die Perkolation sowie den Zwischenabfluss während dem Regenereignis beeinflusst, während vor und nach einem Regenereignis vor allem die Transpiration von Bedeutung ist [1]. Zwischen der Waldfläche und der Schlagfläche gibt es nur geringe Unterschiede und keine deutliche Tendenz. Dennoch zeigen die Werte aus den Messstationen einen signifikanten Einfluss des Standorts, der Sukzessionszeit, der Vorfeuchtigkeit und der Regenhöhe, während für die Werte aus den Regensimulatoren jedoch keine der berücksichtigten Einflussvariablen signifikant ist.

Die gemessenen Werte zum Bodenwasser können wegen der fehlenden gemeinsamen Angaben nur bedingt mit der als Referenz verwendeten Wasserbilanz im Wald verglichen werden [10]. Demnach ist auf der Waldfläche eine höhere Transpiration aber eine niedrigere Perkolation zu erwarten als auf der Schlagfläche, welche jedoch in dieser Untersuchung nicht gemessen werden. Die gemessenen Feuchtigkeitsinkremente liegen unter Berücksichtigung der Profiltiefe von 1 m bei den Messstationen und von 0.5 m bei den Regensimulatoren in der Grössenordnung der Abflusshöhe im Bereich von 10 mm. Die Unterschiede zwischen der Waldfläche und der Schlagfläche liegen wiederum in einer Grössenordnung von 1 mm und sind somit während der untersuchten Zeitspanne nicht relevant.

Zur Schliessung der Wasserbilanz verbleibt ein nicht gemessener Term, welcher auf der Waldfläche grösser ist als auf der Schlagfläche. Eine Verringerung der Perkolation und des Zwischenabflusses durch den Holzschlag sind erst nach einem Verlust der Wurzelsysteme und der damit verbundenen Makroporosität in den mineralischen Bodenschichten zu erwarten, was verzögert auftritt und durch die vegetative Vermehrung der Kastanien abgeschwächt wird. Naheliegender ist ein mit den Hygrometern nicht erfasstes Speichervermögen der organischen Bodenschichten, welche auf der Schlagfläche rasch beeinträchtigt wurden.

4.2 Bodendynamik

4.2.1 Oberflächenerosion

Die Oberflächenerosion des Bodenkörpers wird wesentlich durch dessen Erosionswiderstand und durch die Schleppwirkung der Wasserflüsse bestimmt [11]. Beide unterscheiden sich auf der Schlagfläche von der Waldfläche, wo sowohl der Wasserfluss grösser aber auch der Erosionswiderstand kleiner ist. Dies führt zur einer deutlich höheren Oberflächenerosion auf der Schlagfläche, welche durch die Behandlung mit Mulch wiederum wesentlich verringert werden kann. Der Standort hat einen signifikanten Einfluss auf die Erosionsmasse, neben der Hangneigung, der Sukzessionszeit und der Abflusshöhe. Grundsätzlich nimmt die Erosionsmasse mit zunehmender Hangneigung und Abflusshöhe zu. Auf der Schlagfläche ohne Behandlung zeigt sich weiterhin eine klare Tendenz mit einer Abnahme der Erosionsmasse über die Sukzessionszeit.

Diese signifikanten Unterschiede in der Oberflächenerosion werden sowohl mit den Kastenerosimeter wie auch mit den Regensimulatoren gemessen. Dabei sind die Werte aus den Regensimulatoren eine Grössenordnung kleiner als die Werte aus den Kastenerosimeter, auch wenn die Erosionsmasse als Verhältnis

zur Abflusshöhe betrachtet wird. Dies kann sowohl auf die kürzere Dauer der Regenereignisse wie auch die geringeren Fallenergien der Regentropfen bei den Regensimulatoren erklärt werden. Zusätzlich hat der Zeitpunkt der Regensimulationen nach einer Sukzessionszeit von über 2 y einen Einfluss, weil auf der Schlagfläche die leichter erodierbaren organischen Bodenschichten bereits abgetragen sind. Die klare Tendenz mit einer um eine Grössenordnung kleinere Oberflächenerosion auf der Waldfläche gegenüber der Schlagfläche zeigt sich jedoch bei beiden Messungen.

Diese hohen Werte der Oberflächenerosion auf der Schlagfläche zeigen sich auch in der flächigen Abschätzung der Drohnensbilder. Dabei zeigt sich ein räumlich differenziertes Bild der Oberflächenerosion mit teilweise deutlich höheren Werten, als sie mit den Kastenerosimeter gemessen werden. Diese Unterschiede können einerseits mit der eingeschränkten Einzugsfläche der Kastenerosimeter erklärt werden, aber auch mit einer räumlichen Variabilität in der Erosionsanfälligkeit über die Schlagfläche. Mit der Modellierung, welche die Einzugsfläche ebenfalls berücksichtigt, werden ähnlich hohe Werte wie aus der Abschätzung der Drohnensbilder berechnet.

Die Zuordnung der gemessenen Erosionsmassen zu den Gefährdungsstufen der Erosionsrisikokarte ermöglicht eine Interpretation bezüglich der Richtwerte in der Landwirtschaft [4]. Dies führt auf der Waldfläche wie auch für die Schlagfläche mit Behandlung auf grün (0 bis 20 t/ha), wobei Letztere an der Grenze zu gelb (20 bis 40 t/ha) liegt. Auf der Schlagfläche ohne Behandlung führt dies in den ersten beiden Jahren auf rot (grösser 40 t/ha), wobei im dritten Jahr nur noch gelb erreicht wird (20 bis 40 t/ha). Demnach gibt es in der Ausgangslage vor dem Holzschlag keine Gefährdung. In den ersten Jahren nach dem Holzschlag wird eine hohe Gefährdung erreicht, welche auf eine mittlere Gefährdung zurückgeht. Die Behandlung mit Mulch hat einen grossen Einfluss auf die Oberflächenerosion und behält diese im Übergangsbereich von keiner zu mittleren Gefährdung.

4.2.2 Bodenauswaschung

Die Bodenauswaschung ist ein begleitender Prozess des Oberflächenabflusses und der Oberflächenerosion, welcher sich in diesem Zusammenhang auf die Bodenoberfläche bezieht. Weil der Oberflächenabfluss und die Oberflächenerosion in den Kastenerosimeter gemeinsam gesammelt werden, beziehen sich die gemessenen Stoffkonzentration auf deren gesamte Mischung. Dabei zeigen der Kohlenstoff, der Stickstoff und der Phosphor unterschiedliche Muster. Auf alle untersuchten Stoffkonzentrationen haben der Standort und die Sukzessionszeit einen signifikanten Einfluss, während nur der Phosphor auch signifikant durch die Abflusshöhe beeinflusst wird.

Die Stoffkonzentration von Kohlenstoff ist am höchsten auf der Waldfläche, gefolgt von der Schlagfläche mit Behandlung und am niedrigsten für die Schlagfläche ohne Behandlung. Die Stoffkonzentration von Stickstoff ist am höchsten auf der Schlagfläche ohne Behandlung, gefolgt von der Schlagfläche mit Behandlung und am niedrigsten für die Waldfläche. Die Stoffkonzentration von Phosphor ist am höchsten auf der Schlagfläche mit Behandlung, gefolgt von der Waldfläche und am niedrigsten für die Schlagfläche ohne Behandlung. Bei allen Stoffkonzentrationen ist eine Abnahme vom ersten zum zweiten Jahr feststellbar, welche auf der Schlagfläche ausgeprägter ist als auf der Waldfläche. Dies ist ein Hinweis auf eine verstärkte Auswaschung auf der Schlagfläche, welche beim Stickstoff besonders ausgeprägt ist.

Ein Vergleich mit den Grenzwerten für die Beurteilung von Fließgewässern ermöglicht eine Abschätzung

der chemischen Auswirkungen auf die Vorfluter[2]. Für Kohlenstoff wird der Grenzwert (5 mg/l) im Oberflächenabfluss durchgehend auf allen Teilflächen überschritten. Für Stickstoff wird der Grenzwert (7 mg/l) im Oberflächenabfluss teilweise auf allen Teilflächen überschritten, vor allem auf der Schlagfläche ohne Behandlung. Für Phosphor wird der Grenzwert (0.07 mg/l) teilweise auf allen Teilflächen überschritten, im zweiten Jahr auf der Schlagfläche jedoch nur noch knapp aber auf der Waldfläche durchgehend. Diese Stoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss sind nicht unbedingt gleichzusetzen mit den Stoffkonzentration im Fließgewässer, sind jedoch ein Hinweis auf mögliche Auswirkungen auf die Eutrophierung in den Vorflutern, in welche solche Flächen entwässern.

4.2.3 Bodenbedeckung

Die Bodenbedeckung erfasst den Zustand der Bodenoberfläche, welcher im Zusammenhang mit dem Oberflächenabfluss und der Oberflächenerosion steht. Dabei zeigen die Vegetation und die Blattstreu unterschiedliche Muster auf den Teilflächen mit näherungsweise konstanten Deckungsgraden auf der Waldfläche und zunehmenden Deckungsgraden auf der Schlagfläche. Es ist anzunehmen, dass die Bodenbedeckung auf der Schlagfläche vor dem Holzschlag ähnlich ist wie auf der Waldfläche, also fast ohne Vegetation und mit viel Blattstreu.

Die flächige Abschätzung der Bodenbedeckung der Vegetation mit den Drohnenbildern bestätigt diese Zunahme der Deckungsgrade auf der Schlagfläche, welche aber weniger rasch erfolgt als in den Kastenerosimetern. Während mit den Drohnenbilder auch die Gehölzvegetation erfasst werden kann, wird in den Kastenerosimetern nur die Krautvegetation erhoben. Die grossen Unterschiede im Vegetationszuwachs und dem tiefen Durchschnitt weisen darauf hin, dass ein grosser Teil des Deckungsgrads auf die Krautvegetation zurückzuführen ist. Vor allem durch Stockausschlag der Kastanie erholt sich auch die Gehölzvegetation mit einem grossen Höhenzuwachs aber auf kleinerer Fläche.

Auf der Waldfläche wird keine wesentliche Änderung der Vegetation aber eine einmalige Zunahme der Blattstreu gemessen. Letztere kann auf Sturmereignisse zurückgeführt werden, welche zu einer grossen Laubablagerung auf der Waldfläche geführt haben. Auf der Schlagfläche gibt es nach dem Holzschlag näherungsweise keine Vegetation und keine Blattstreu. Letztere wurde vermutlich durch die Oberflächenerosion abgetragen und erholt sich nur langsam. Dafür kommt auf der Schlagfläche vergleichsweise rasch Vegetation auf und erreicht nach 2 y ähnliche Werte des Deckungsgrades wie die Blattstreu auf der Waldfläche. Es ist anzunehmen, dass diese Zunahme der Vegetation aufgrund ihrer stabilisierenden Wirkung die wesentliche Ursache für die Abnahme der Oberflächenerosion ist [7]. Mit der weiteren Erholung der Blattstreu und der damit verbundenen organischen Bodenschichten wird voraussichtlich auf der Oberflächenabfluss abnehmen.

5 Schlussfolgerungen

Diese Untersuchung zeigt auf, dass sich der grossflächige Holzschlag signifikant auf die Wasserbilanz und die Bodendynamik auswirkt und zu einer vorübergehenden Zunahme von Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion führt. Über die ersten Jahre zeigt sich eine Normalisierung der Situation auf der

Schlagfläche, welche sich gemäss der Modellierung mit einer charakteristischen Zeitskala in der Grössenordnung von 100 y für den Oberflächenabfluss und von 10 y für die Oberflächenerosion entwickelt. Diese Entwicklung zeigt, dass die Gefahr eines totalen Bodenverlusts auf dem untersuchten Standort gering ist, aber auch, dass die hydrologische Schutzwirkung des Waldes gegen Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion vorübergehend stark beeinträchtigt wird.

Diese Beeinträchtigung kann ungünstige Auswirkungen auf den Vorfluter eines Teileinzugsgebiets haben. Der Verlust der Waldfläche führt zu einer Zunahme der Abflussbildung, der Geschiebefracht und der Eutrophierung. Damit verbunden ist eine Zunahme der Gefährdung durch Wasserprozesse und ein Abnahme der Wasserqualität. Diese Auswirkung können signifikante Ausmasse annehmen, wenn grosse Flächen im Teileinzugsgebiet entwaldet werden und diese Flächen in besonders ungünstigen Lagen mit grosser Hangneigung und Fliessakkumulation liegen. Als Richtlinien bezüglich Oberflächenabfluss und Oberflächenerosion wird deshalb vorgeschlagen, dass auf der Ebene des Teileinzugsgebiets die Abflussbeiwertklasse wie auch die Gefährdungsstufen für das Erosionsrisiko höchstens im gelben Bereich liegen dürfen.

Daraus lassen sich für die Nutzung solcher Kastanienbestände angepasste Ansätze für die Waldbewirtschaftung ableiten. Die notwendigen Holzschläge sollten über mehrere Jahre auf ein gesamtes Teileinzugsgebiet geplant werden. Eine Aufteilung in kompakte Schlagflächen, welche nicht aneinander grenzen und nacheinander geöffnet werden, ermöglicht eine räumliche und zeitliche Verteilung und damit auf der Ebene des Teileinzugsgebiets eine Verminderung der ungünstigen Auswirkungen. Dabei sollten die Hangneigung und die Fliessakkumulation berücksichtigt werden, wobei in flachen Rücken grössere Schlagflächen geöffnet werden können als in steilen Mulden. Grundsätzlich ist auch eine Nutzung als Niederwald mit kurzen Umtriebszeiten in der Grössenordnung von 10-35 y möglich, wenn durch Berücksichtigung dieser Aspekte die Richtlinien auf der Ebene des Teileinzugsgebiets eingehalten werden können.

Literatur

- [1] S Augustin und S Braun. *Der Wasserhaushalt der Waldboeden*. 2016.
- [2] BAFU. *Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Chemisch-physikalische Erhebungen, Nährstoffe*. 2010.
- [3] BAFU. *SilvaProtect-CH: Hydrologische Wirksamkeit des Waldes*. 2013.
- [4] BAFU und BWL. *Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft*. 2013.
- [5] F Cellina u. a. *Partizipative Erarbeitung von Bewirtschaftungsszenarien fuer den Tessiner Kastanienguertel*. 2018.
- [6] M Conedera. *Erosion und Oberflaechenabfluss nach Braenden*. 2006.
- [7] C Graf, A Boell und F Graf. *Pflanzen im Einsatz gegen Erosion und oberflaechennahe Rutschungen*. 2003.
- [8] C Hegg u. a. *Lothar und Wildbäche. Schlussbericht eines Projektes im Rahmen des Programms «LOTHAR Evaluations- und Grundlagenprojekte»*. 2004.
- [9] G Markart, B Kohl und K Klebinder. *Wildbachprozesse: Hochwasser, Wirkungen des Waldes und Maßnahmen in der Fläche*. 2014.
- [10] G Markart, B Kohl und F Perzl. *Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung - eine unterschätzte Größe?* 2007.
- [11] V Prasuhn u. a. *Abschaetzung des Bodenfaktors für die Uebersichtskarte der Bodenerosionsgefaehrung der Schweiz*. 2010.
- [12] H Puhlmann. *Waldboeden und ihre Wirkung auf den Wasserhaushalt*. 2023.
- [13] C Rickli und F Forster. *Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schaetzung von Hochwasserabfluessen in kleinen Einzugsgebieten*. 1997.
- [14] Swisstopo. *GeoCover*. 2022.
- [15] Swisstopo. *swissALTI3D*. 2022.
- [16] W Weinmeister. *Faehigkeiten des Waldes zur Verminderung von Hochwasser und Erosionsschaeden*. 2003.

Abbildungsverzeichnis

1	Karte zum Untersuchungsgebiet mit dem Einzugsgebiet (blau) der Waldfläche (grün) und in der Schlagfläche (braun) mit Angabe der Höhe über Meer (SWISSALTI3D) referenziert auf die Koordinaten der Landesvermessung (EPSG:2056).	7
2	Karte zum Untersuchungsgebiet mit den Installationen auf der Waldfläche (grün) und auf der Schlagfläche (braun) mit Angabe der Höhe über Meer (SWISSALTI3D) referenziert auf die Koordinaten der Landesvermessung (EPSG:2056).	9
3	Messwerte der Regenhöhe aus den Messstationen kumuliert über jedes berücksichtigte Regenereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Regenhöhe für jede Teilfläche.	18
4	Messwerte des Regeninkrements zur Quantifizierung der Regeninterzeption aus den Messstationen für die Bezugsebene des Regenereignisses (oben) und des Kalenderjahres (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Regeninkrements.	19
5	Messwerte des Oberflächenabflusses aus den Kastenerosimeter kumuliert über jedes berücksichtigte Ereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Abflusshöhe für jede Teilfläche und Behandlung.	22
6	Messwerte der Abflusshöhe zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses aus den Kastenerosimeter für die Ebene des Regenereignisses (oben) und des Kalenderjahres (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Abflusshöhe.	23
7	Messwerte der Oberflächenerosion aus den Kastenerosimeter kumuliert über jedes berücksichtigte Ereignis. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Erosionsmasse für jede Teilfläche und Behandlung.	29
8	Messwerte der Erosionsmasse zur Quantifizierung der Oberflächenerosion aus den Kastenerosimeter für die Ebene Ereignis (oben) und Jahr (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Erosionsmasse.	30
9	Messwerte der Bodenfeuchtigkeit zur Quantifizierung der Bodenwassers aus den Messstationen. Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Bodenfeuchtigkeit für jede Teilfläche.	36
10	Messwerte des Feuchtigkeitinkrements zur Quantifizierung des Bodenwassers aus den Messstationen für jedes berücksichtigte Ereignis. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Feuchtigkeitsinkrements.	37
11	Messwerte der Stoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss zur Quantifizierung der Bodenauswaschung aus den Kastenerosimeter mit Kohlenstoff (oben), Stickstoff (mitte) und Phosphor (unten). Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Stoffkonzentrationen für jede Teilfläche und Behandlung.	40
12	Messwerte der Stoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss zur Quantifizierung der Bodenauswaschung aus den Kastenerosimeter mit Kohlenstoff (oben), Stickstoff (mitte) und Phosphor (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Stoffkonzentrationen.	41
13	Messwerte der Deckungsgrade zur Quantifizierung der Bodenbedeckung in den Kastenerosimeter aufgeteilt in Vegetation (oben) und Blattstreu (unten). Die Linien zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) der Deckungsgrade für jede Teilfläche und Behandlung.	48

14	Messwerte der Deckungsgrade zur Quantifizierung der Bodenbedeckung in den Kastenrosimeter aufgeteilt in Vegetation (oben) und Blattstreu (unten). Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Deckungsgrade.	49
15	Messwerte der Abflusshöhe zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Abflusshöhe.	54
16	Messwerte der Erosionsmasse zur Quantifizierung der Oberflächenerosion aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser der Erosionsmasse.	56
17	Messwerte des Feuchtigkeitinkrements zur Quantifizierung des Bodenwassers aus den Regensimulationen für 2 Wiederholungen auf 5 Profilen mit jeweils 100 mm über 1 h. Die Boxplots zeigen die Quantile (25 %, 50 % und 75 %) und die Ausreisser des Feuchtigkeitinkrements.	58
18	Karten der Drohnenbilder als Orthomosaik auf der Fläche des Holzschlags für die Jahre 2019, 2022 und 2023.	60
19	Karten der jährlichen Erosionsvolumen für die Differenzen zwischen 2019 und 2022 sowie zwischen 2022 und 2023.	61
20	Karten der jährlichen Vegetationszuwachs für die Differenzen zwischen 2019 und 2022 sowie zwischen 2022 und 2023.	62
21	Karte der Modellwerte zum jährlichen Oberflächenabfluss im Teileinzugsgebiet um das Untersuchungsgebiet über verschiedenen Grössenordnungen der Sukzessionszeit.	64
22	Karte der Modellwerte zur jährlichen Oberflächenerosion im Teileinzugsgebiet um das Untersuchungsgebiet über verschiedenen Grössenordnungen der Sukzessionszeit.	66

Tabellenverzeichnis

1	Charakterisierung des Untersuchungsgebiet bezüglich Topografie, Geologie, Boden und Vegetation auf der Basis von Grundlagenkarten und Feldaufnahmen.	8
2	Übersicht zu den Messstationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.	10
3	Details zu den Messstationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.	11
4	Übersicht zu den Kastenerosimeter im Untersuchungsgebiet von Bedano.	13
5	Übersicht zu den Regensimulationen im Untersuchungsgebiet von Bedano.	15
6	Übersicht zu den Drohnenbilder im Untersuchungsgebiet von Bedano.	16
7	Quantile der Regeninkremente gemessen mit den Messstationen zur Quantifizierung des Regeninterzeption.	19
8	Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Regeninterzeption mit $\ln(\text{Regeninkrement})$ aus den Messstationen als Zielvariable.	20
9	Regression (LMER) der Regeninterzeption mit $\ln(\text{Regeninkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.	21
10	Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses auf der Bezugsebene des Regenereignisses.	24
11	Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.	25
12	Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	26
13	Regression (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Regenereignisses.	27
14	Regression (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.	28
15	Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Oberflächenerosion auf der Bezugsebene des Regenereignisses.	31
16	Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Oberflächenerosion auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.	32
17	Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	33
18	Regression (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Regenereignisses.	34
19	Regression (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable auf der Bezugsebene des Kalenderjahres.	35
20	Quantile der Feuchtigkeitinkremente gemessen mit den Messstationen zur Quantifizierung des Bodenwassers.	38
21	Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitinkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.	38
22	Regression (LMER) des Bodenwassers mit $\ln(\text{Feuchtigkeitinkrement})$ aus den Messstationen als Zufallsvariable.	39
23	Quantile der Stoffkonzentration von Kohlenstoff im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.	42
24	Quantile der Stoffkonzentration von Stickstoff im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.	42

25	Quantile der Stoffkonzentration von Phosphor im Oberflächenabfluss gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenauswaschung.	43
26	Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Bodenauswaschung mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ im Oberflächenabflusses gemessen mit den Kastenerosimeter als Zufallsvariablen.	44
27	Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Kohlenstoff mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	45
28	Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Stickstoff mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	46
29	Regression (LMER) der Bodenauswaschung von Phosphor mit $\ln(\text{Stoffkonzentration})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	47
30	Quantile der Deckungsgrade der Vegetation gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.	50
31	Quantile der Deckungsgrade der Blattstreu gemessen mit den Kastenerosimeter zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.	51
32	Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Bodenbedeckung mit $\ln(\text{Deckungsgrad})$ gemessen mit den Kastenerosimeter als Zufallsvariablen.	52
33	Regression (LMER) der Bodenbedeckung mit $\ln(\text{Deckungsgrad})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable.	53
34	Quantile der Abflusshöhe gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses.	54
35	Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	55
36	Regression (LMER) zum Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	55
37	Quantile der Erosionsmasse gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung der Oberflächenerosion.	56
38	Varianzanalyse (PERMANOVA) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	57
39	Regression (LMER) zur Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	57
40	Quantile der Feuchtigkeitinkremente gemessen mit den Regensimulatoren zur Quantifizierung des Bodenwassers.	58
41	Varianzanalyse (PERMANOVA) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitsinkrement})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	59
42	Regression (LMER) zum Bodenwasser mit $\ln(\text{Feuchtigkeitsinkrement})$ aus den Regensimulationen als Zufallsvariable.	59
43	Quantile der jährlichen Erosionsvolumen berechnet aus den Drohnenbildern zur Quantifizierung der Oberflächenerosion.	61
44	Quantile des Vegetationszuwachses berechnet aus den Drohnenbildern zur Quantifizierung der Bodenbedeckung.	63
45	Modellierung (LMER) des Oberflächenabfluss mit $\ln(\text{Abflusshöhe})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable für die Aufskalierung der Prozesse.	63
46	Modellierung (LMER) der Oberflächenerosion mit $\ln(\text{Erosionsmasse})$ aus den Kastenerosimeter als Zufallsvariable für die Aufskalierung der Prozesse.	65